

PROYECTO FIN DE CARRERA



APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO C-SCAN CON ACOPLAMIENTO DE AIRE PARA LA INSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS SÁNDWICH DE MATERIAL COMPUESTO

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE
MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA
SUPERIOR**

OCTUBRE 2009

Autor: Jose Antonio Merino Sierra
Tutora: Brenda L. Buitrago Pérez

Agradecimientos

*A mi madre,
por animarme y comprenderme, haciéndome creer que todo llegaría.*

*A mi hermano,
por soportarme durante todos estos años.*

*A mi padre,
por todos los esfuerzos que has hecho por nosotros.
Sin ti, este momento no hubiera sido posible.*

A todos los que compartisteis conmigo días y días en la biblioteca.

*A mis amigos, compañeros de escuela y profesores...
pues siempre tuvisteis algo que enseñarme.*

*Y, a ti, Bego,
por tu cariño e incondicional apoyo durante estos últimos años.*

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	4
1.1	MOTIVACIÓN	4
1.2	OBJETIVOS.....	4
1.3	CONTENIDO.....	5
2	MARCO TEÓRICO	7
2.1	INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS	7
2.2	FÍSICA DE LOS ULTRASONIDOS.....	8
2.2.1	PROPAGACIÓN DE ONDAS.....	8
2.2.2	MODOS DE PROPAGACIÓN	10
2.2.3	PROPIEDADES DE LAS ONDAS	11
2.2.4	LONGITUD DE ONDA Y DETECCIÓN DEL DEFECTO	11
2.2.5	PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN MATERIALES ELÁSTICOS....	11
2.2.6	ATENUACIÓN DE LAS ONDAS	14
2.2.7	IMPEDANCIA ACÚSTICA	15
2.2.8	COEFICIENTES DE REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN	15
2.2.9	REFRACCIÓN Y LEY DE SNELL	16
2.2.10	CONVERSIÓN DE MODOS.....	17
2.2.11	INTERFERENCIA DE LAS ONDAS	17
2.2.12	RADIACIÓN DE CAMPOS ULTRASÓNICOS	18
2.2.13	HAZ DE PROPAGACIÓN Y HAZ DE DIVERGENCIA DEL TRANSDUCTOR.....	20
2.2.14	ACOPLANTE	21
2.2.15	LA PRESENTACIÓN DE LOS DATOS (A-SCAN, B-SCAN y C- SCAN)	22
2.3	TÉCNICA ULTRASONIDOS CON ACOPLAMIENTO DE AIRE	25
2.3.1	EFFECTOS DE LA FRECUENCIA	26
2.3.2	DIFERENTES CONFIGURACIONES PARA UNA INSPECCIÓN	27
2.3.3	APLICACIONES	27
3	ANTECEDENTES	30
3.1	EL AIRE COMO MEDIO ACOPLANTE	30
3.2	APLICACIONES DE LA TÉCNICA EN MATERIALES COMPUESTOS TIPO SANDWICH.....	34
4	DESARROLLO EXPERIMENTAL	36
4.1	MATERIAL	36
4.2	EQUIPO DE INSPECCIÓN.....	38
4.2.1	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS SONDA 007CX.....	40
4.2.2	TRANSDUCTORES	41
4.3	SOFTWARE UTILIZADO EN LAS INSPECCIONES (SETUP SCAN / VISUAL SCAN)	42
4.4	PARÁMETROS DE LA SONDA.....	47
4.5	PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	48
5	RESULTADOS	52
5.1	VARIACIÓN DE LOS AJUSTES EN LA PRESENTACIÓN	52
5.2	RESULTADOS DE PROBETAS IMPACTADAS	54
5.3	EFFECTO DEL INDEX.....	61
5.4	EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE INSPECCIÓN	62
5.5	EFFECTO DE LA VELOCIDAD PARA DISTINTAS GANANCIAS	66



5.6	MODIFICACIÓN DEL WIDTH	67
5.7	MODIFICACIÓN DEL CYCLE.....	68
5.8	EFFECTO DE LA ATENUACIÓN	69
5.9	EFFECTO DE LA FRECUENCIA DEL TRANSDUCTOR.....	70
5.10	EFFECTO DEL DIÁMETRO DEL TRANSDUCTOR.....	71
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	72
7	METODOLOGÍA DE ENSAYO	85
7.1	POSICIONAMIENTO DE LA PROBETA	85
7.2	POSICIONAMIENTO DE LOS TRANSDUCTORES	86
7.3	ENCENDIDO Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA	88
7.4	AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE LA SONDA	90
7.5	RESUMEN PARÁMETROS DE INSPECCIÓN	91
8	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	92
8.1	CONCLUSIONES.....	92
8.2	TRABAJOS FUTUROS.....	93
9	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	94

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Por la emergente aplicación que tienen las estructuras de material compuesto tipo sándwich en diferentes campos de la industria en general, es necesario desarrollar procedimientos de inspección que permitan detectar tempranamente la presencia de discontinuidades que afecten a las propiedades de dichos materiales. En el desarrollo de este proyecto se pretende realizar un estudio mediante la técnica de ensayo no destructivo por ultrasonido que permita establecer los parámetros básicos de la inspección para alguno de estos materiales.

En este proyecto se analizarán estructuras tipo sándwich de material compuesto fabricado con pieles de fibra de carbono con matriz de resina epoxi y núcleo panel de abeja en aluminio. Como la mayoría de las estructuras tipo sándwich combinan dos interesantes propiedades, bajo peso y alta resistencia. Además dado el conocimiento tecnológico actual, el ingeniero es capaz de diseñar materiales, con las propiedades más óptimas para cada aplicación, obligando a éste a diseñar métodos de inspección válidos para cada tipo de material, en este sentido, se determinará como aplicar la técnica de ultrasonidos con acoplamiento de aire para este tipo de materiales.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología de ensayo mediante la técnica de ultrasonidos con acoplamiento de aire, válida para inspeccionar estructuras tipo sándwich de materiales compuesto con pieles de fibra de carbono y núcleo tipo panel de abeja de aluminio.

Para desarrollar correctamente una metodología de ensayo es necesario llevar a cabo diferentes objetivos específicos con el fin de conocer la influencia de diferentes parámetros que intervienen en el ensayo, tales como:

- La frecuencia del transductor.
- La velocidad de barrido durante la inspección.
- El *index* o paso del barrido.
- La atenuación de la señal.
- La ganancia del equipo.

Es necesario además considerar las tendencias de otros investigadores en cuanto al uso de esta técnica de inspección para la configuración de este material seleccionado, como es aplicada y los criterios utilizados.

También se evaluarán dos *softwares*, para determinar el área dañada de las probetas y la eficacia de cada uno de ellos en la medición realizada.

1.3 CONTENIDO

El presente trabajo se ha estructurado en nueve capítulos, los cuales se describen a continuación:

En este primer capítulo se recogen las motivaciones y los objetivos específicos planteados para lograr alcanzar el objetivo principal, desarrollar una metodología de inspección por ultrasonidos con acoplamiento de aire para material compuesto fabricado con pieles de fibra de carbono con matriz de resina epoxi y núcleo panel de abeja en aluminio.

El capítulo 2 corresponde al *marco teórico*, el cual contempla los principios generales de la técnica de ultrasonidos, así como diversas consideraciones físicas sobre la técnica, las formas de presentación de resultados (*A-Scan*, *B-Scan* y *C-Scan*), particularización teórica para el caso de utilizar aire como medio acoplante, efectos teóricos de la variación de la frecuencia y aplicaciones más habituales de la técnica considerada.

El capítulo 3 corresponde a los *antecedentes*, en donde se recopilan las investigaciones realizadas por otros autores sobre la técnica de ultrasonidos en aire, para este material y para otros materiales. Así como diversos estudios, empleando la técnica de ultrasonidos en aire.

En el capítulo 4 se presenta el *desarrollo experimental* en el cual se describe el material empleado en los ensayos, el software incluido en el equipo, el funcionamiento del sistema *Airscan*, así como del generador de señal, también se detalla cómo llevarán a cabo las inspecciones, y que es lo que se persigue en cada uno de los ensayos realizados.

En el capítulo 5 muestra los *resultados* obtenidos con el equipo, estableciendo comparativas entre diversas variables de la inspección y las imágenes obtenidas.

El capítulo 6 se realizará un *análisis de los resultados*, basado fundamentalmente en el cálculo de las áreas dañadas, mediante dos software de inspección distintos, y comparando resultados.

En el capítulo 7 se pretende determinar una *metodología de ensayo*, que sirva para realizar inspecciones al material tipo sándwich considerado, así como la forma proceder durante el desarrollo de las mismas.

En el capítulo 8, se obtienen *conclusiones* del proyecto, en cuanto a consideraciones de determinación de áreas o el efecto de los diferentes parámetros que intervienen en los ensayos, así como la obtención de una velocidad óptima de barrido. En este capítulo también se propone una línea de trabajos para desarrollar en un futuro.

Para finalizar y cerrar el proyecto, en el capítulo 9, se apunta la *bibliografía y referencias* empleadas en el desarrollo de este proyecto y se incluirá una serie de *anexos*, relativos a la documentación técnica aportada por el fabricante del equipo de



inspección, así como una copia de los certificados de calibración de los transductores empleados en los ensayos.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS

Las pruebas de ultrasonido utilizan energía de alta frecuencia para llevar a cabo las inspecciones. La inspección por ultrasonidos puede ser utilizada para detectar y evaluar fallos, realizar mediciones dimensionales, caracterización del material, y mucho más. Para ilustrar el principio general de la inspección, en la figura 1, se muestra un esquema básico de inspección mediante la técnica pulso / eco típico:

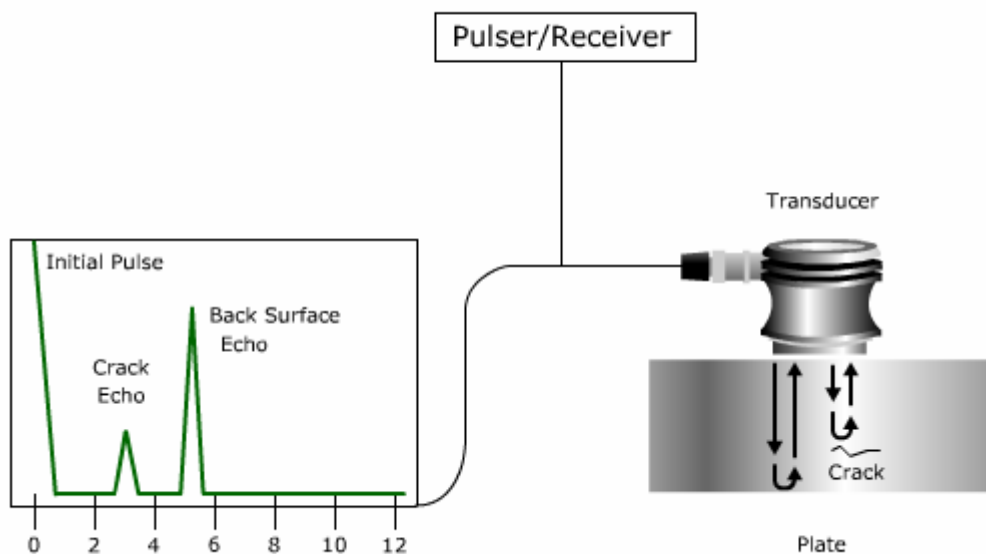


Fig. 1. Esquema básico de funcionamiento del método de inspección por ultrasonidos.
Imagen tomada de [1].

Un sistema típico de inspección se compone de varias unidades funcionales, tales como el emisor/receptor, el transductor, y los dispositivos de visualización (pantalla). Un emisor/receptor es un dispositivo electrónico que produce impulsos eléctricos de alta energía. Impulsado por el emisor, el transductor de alta frecuencia genera la energía ultrasónica. El ultrasonido se introduce y se propaga a través de los materiales en forma de ondas. Cuando hay una discontinuidad (como una grieta) en el camino de la onda, parte de la energía se refleja en la imperfección de la superficie. La señal reflejada se transforma en una señal eléctrica por el transductor y se visualiza en una pantalla. En la figura 1, se mostraba la fuerza de la señal frente al tiempo de generación de las señales cuando un eco es recibido. El tiempo de viaje de la señal puede estar directamente relacionado con la distancia que recorre. A partir de la señal, la información sobre la ubicación de la reflexión, el tamaño, la orientación y otras características pueden ser conocidas.

La inspección por ultrasonidos es muy útil y versátil en el mundo de los ensayos no destructivos. Algunas de las **ventajas** de la inspección ultrasónica que a menudo son mencionadas son:



- Sensibilidad a las discontinuidades superficiales y subsuperficiales.
- La profundidad de penetración para la detección de fallos o la medición de éstos es superior a otras técnicas.
- Sólo es necesario una cara de acceso al material cuando se utiliza la técnica de pulso-eco.
- La determinación de la posición de la reflexión para estimar el tamaño y la forma del defecto es muy precisa.
- Se requiere una preparación del ensayo mínima.
- Los equipos electrónicos proporcionan resultados instantáneos.
- Las imágenes pueden ser generadas con sistemas automatizados.
- Se puede emplear la técnica de ultrasonidos, para otros usos, tales como las mediciones del espesor, además de la detección de fallos.

Al igual que con todos los métodos de END (Ensayos No Destructivos), la inspección ultrasónica también tiene sus **limitaciones**, que incluyen:

- La superficie debe ser accesible para transmitir el ultrasonido.
- La destreza y formación del inspector es más amplia que con otros métodos.
- Normalmente se produce un acoplamiento al medio y se produce la transferencia de energía sonora a la muestra.
- Materiales con forma irregular, muy pequeños, excepcionalmente delgados o no homogéneos son difíciles de inspeccionar.
- Las fundiciones de hierro y otros materiales de grano grueso son difíciles de inspeccionar debido a la baja transmisión de sonido en su interior y elevada señal de ruido.
- Defectos lineales orientados en paralelo a la dirección del haz del sonido pueden resultar desapercibidos.
- Es necesario usar normas de referencia para calibrar los equipos y caracterizar defectos.

2.2 FÍSICA DE LOS ULTRASONIDOS

En este punto se exponen los diferentes fenómenos físicos que han de tenerse en cuenta cuando se usa un sistema de inspección por ultrasonidos.

2.2.1 PROPAGACIÓN DE ONDAS

Las pruebas por ultrasonido se basan en pequeñas deformaciones o vibraciones de variables en el tiempo. Todos los materiales se componen de átomos, que pueden ser obligados a vibrar sobre sus posiciones de equilibrio. Existen muchos patrones diferentes de movimiento vibracional a nivel atómico, sin embargo, la mayoría son irrelevantes para los fenómenos acústicos y para la prueba de ultrasonidos. La acústica se centra en las partículas que contienen muchos átomos que se mueven al unísono para producir una onda mecánica. Cuando un material no se somete a compresión más allá de su límite elástico, cada una de sus partículas realiza vibraciones elásticas. Cuando las partículas de un medio son desplazadas de sus posiciones de equilibrio interno se producen fuerzas de restauración que en combinación con las de inercia de las partículas, conducen a las vibraciones del medio.

En sólidos, las ondas de sonido pueden propagarse en principio de cuatro modos que se basan en la forma en que las partículas pueden oscilar. El sonido puede propagarse como ondas longitudinales, ondas transversales, ondas superficiales, y como “pequeñas olas” en materiales delgados. Las ondas longitudinales y las ondas transversales son los dos modos de propagación más utilizados en las pruebas de ultrasonidos. El movimiento de las partículas es el responsable de la propagación de las ondas longitudinales y de las ondas transversales tal y como se muestra en la figura 2:

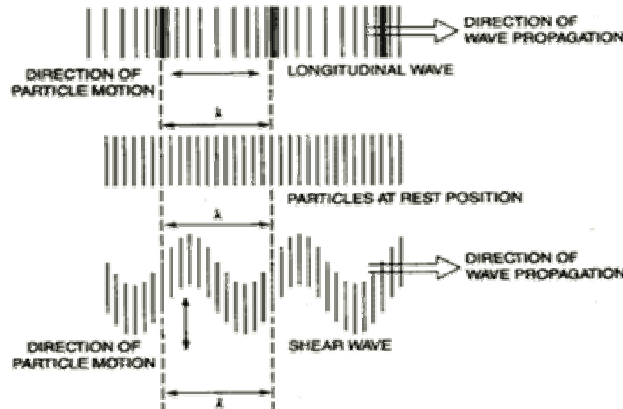


Fig. 2. Movimiento de ondas transversales y longitudinales.
Imagen tomada de [1].

En las ondas longitudinales, las oscilaciones se producen en la dirección longitudinal. La dilatación-compresión y las fuerzas que actúan en estas ondas, hace que sean llamadas también ondas de presión o de compresión. A veces, también son llamadas ondas de densidad de partículas, debido a que, su densidad fluctúa cuando las ondas se mueven, como se observa en la figura 3. Las ondas de compresión se pueden generar en líquidos, así como en sólidos, porque la energía viaja a través de la estructura atómica de la materia.

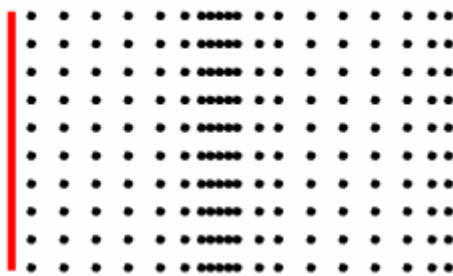


Fig. 3. Propagación de ondas longitudinales.
Imagen tomada de [1].

En las ondas transversales, las partículas oscilan en ángulo recto o transversal a la dirección de propagación, como se muestra en la figura 4. Dichas ondas requieren un material sólido acústicamente eficaz para la propagación, y por lo tanto, no se propaga de manera efectiva en todos los materiales como los líquidos o los gases. Las ondas transversales son relativamente débiles en comparación con las ondas longitudinales. De hecho, las ondas transversales se generan utilizando la energía de las ondas longitudinales.

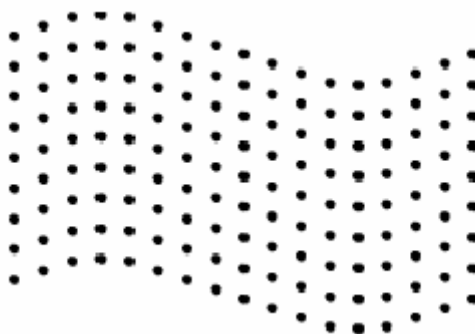


Fig. 4. Propagación de ondas transversales.
Imagen tomada de [1].

2.2.2 MODOS DE PROPAGACIÓN

En el aire, el sonido viaja por la compresión y la refracción de moléculas de aire en la dirección del movimiento. Sin embargo, en los sólidos, las moléculas pueden soportar las vibraciones en otras direcciones, por lo tanto, es posible observar diferentes tipos de ondas de sonido. Las ondas pueden ser caracterizadas por su forma oscilatoria en el espacio de patrones que son capaces de mantener su forma estable. La propagación de las ondas es a menudo descrita en términos de lo que se llama “modos de propagación de onda”.

Como se mencionó anteriormente, las ondas longitudinales y transversales, son las ondas más habituales en la inspección ultrasónica. Sin embargo, en las superficies e intercaras, es posible que aparezcan diversos tipos de ondas elípticas y más complejas vibraciones de las partículas. Algunos de estos modos de onda como ondas de *Rayleigh* y ondas *Lamb*, también son útiles para la inspección ultrasónica.

En la tabla 1, se resumen muchos, pero no todos, de los modos de onda posibles en sólidos.

TIPOS DE ONDA EN SÓLIDOS	VIBRACIONES DE PARTÍCULAS
Longitudinal	Paralelamente a la dirección de las ondas
Transversal	Perpendicular a la dirección de las ondas
Superficie - Rayleigh	Órbita elíptica - Modo simétrico
Onda plana - <i>Lamb</i>	Componente perpendicular a la superficie (onda extensional)
Onda plana - <i>Love</i>	Paralelamente a la cara plana, perpendicular a la dirección de las ondas
Ondas "perforadoras" de Rayleigh	Onda guiada a lo largo de la intercara
<i>Sezawa</i>	Modo antisimétrico

Tabla 1. Tipos de ondas en sólidos. Adaptada de [1].

2.2.3 PROPIEDADES DE LAS ONDAS

Las propiedades fundamentales de las ondas que se propagan en materiales sólidos isotrópicos son: la longitud de onda, la frecuencia, y la velocidad. La longitud de onda es directamente proporcional a la velocidad de la onda e inversamente proporcional a la frecuencia de la onda. Esta relación viene dada por la siguiente ecuación:

$$\lambda(\text{longitud de onda}) = \frac{v(\text{velocidad})}{f(\text{frecuencia})} \quad [\text{Ec. 1}]$$

En las pruebas de inspección por ultrasonidos, la longitud de onda más corta que resulta de un aumento en la frecuencia, conseguirá generalmente la detección de discontinuidades más pequeñas. Este tema será tratado más adelante.

2.2.4 LONGITUD DE ONDA Y DETECCIÓN DEL DEFECTO

En las pruebas de ultrasonidos el inspector debe tomar la decisión sobre la frecuencia del transductor utilizado. Como se ha comentado, modificando la frecuencia cuando la velocidad es constante se cambia la longitud de onda. La longitud de onda del ultrasonido utilizada tiene un efecto significativo en la probabilidad de detección de un defecto. Una regla empírica en inspecciones industriales es que, sólo pueden ser detectadas discontinuidades que son más grandes que la mitad del tamaño de la longitud de onda característica.

La frecuencia de la onda puede afectar a una inspección de manera adversa. Por tanto, la selección de la frecuencia de inspección óptima implica a menudo mantener el equilibrio entre los resultados favorables y desfavorables. Antes de seleccionar una frecuencia de inspección, la estructura de grano, el espesor del material, el tamaño, el tipo, y la localización del defecto más probable de la discontinuidad deben ser considerados. Cuando la frecuencia aumenta, el sonido tiende a dispersar las estructuras grandes y las pequeñas imperfecciones dentro de un material. Los materiales moldeados tienden a menudo a formar granos gruesos y otras dispersiones del sonido requieren frecuencias más bajas para realizar evaluaciones a estos productos. Los productos forjados con estructura de grano direccional y refinado, se pueden examinar generalmente con transductores de frecuencias mayores.

2.2.5 PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN MATERIALES ELÁSTICOS

En las páginas anteriores, se indica que las ondas acústicas se propagan debido a las vibraciones o a los movimientos oscilatorios de partículas dentro del material. Una onda ultrasónica se puede visualizar como un número infinito de masas o de partículas oscilantes conectadas por medio de resortes elásticos, como se muestra en la figura 5. Cada partícula individual es influenciada por el movimiento de su vecino más cercano y las fuerzas de restauración y elásticas actúan sobre cada partícula.

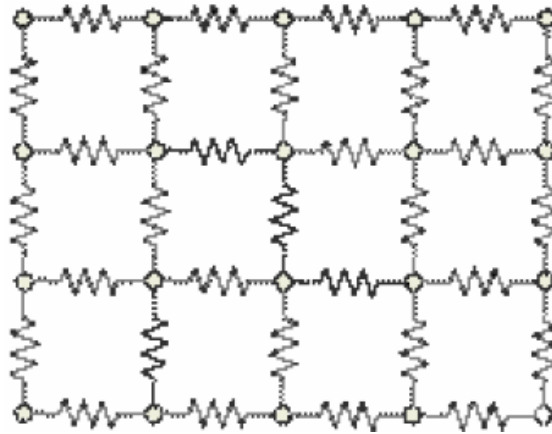


Fig. 5. Partículas conectadas por medio de resortes elásticos.
Imagen tomada de [1].

Una masa conectada a un resorte tiene una sola frecuencia resonante determinada por su constante de rigidez, k , y su masa, m . La constante del resorte es la fuerza de restauración del mismo por su unidad de longitud. Dentro del límite elástico de cualquier material, hay una relación lineal entre la dislocación de una partícula y la fuerza que intenta restaurar dicha partícula a su posición de equilibrio. Esta dependencia lineal viene descrita por la ley de Hooke.

En términos de la ley de Hooke, la fuerza restauradora es proporcional a la longitud del resorte que está siendo estirado, y actúa en dirección opuesta, como se observa en la figura 6. Matemáticamente, la ley de Hooke se formula como, $F = -k \cdot x$ (Ec. 2), donde F es la fuerza, k la constante elástica del resorte, y x la cantidad de dislocación de la partícula.

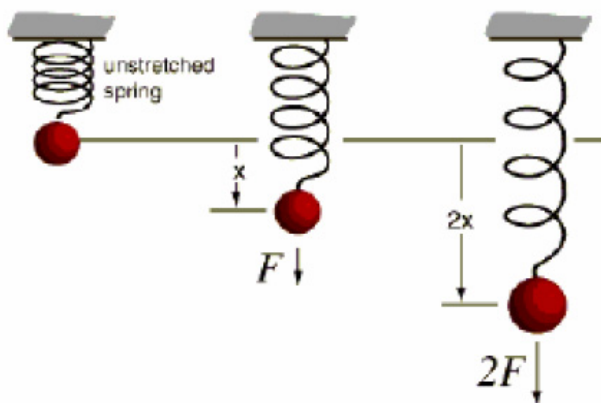


Fig. 6. Representación gráfica de la Ley de Hooke. Imagen tomada de [1].

Velocidad del sonido

La ley de Hooke cuando es formulada junto con la ley de Newton puede explicar algunos aspectos sobre la velocidad del sonido. La velocidad del sonido dentro de un material es función de las propiedades del material e independiente de la amplitud de la onda. La segunda ley de Newton afirma que la fuerza aplicada sobre una partícula es proporcional a la aceleración de la misma y a la masa de ésta. Matemáticamente, la segunda ley de Newton se escribe como $F = m \cdot a$ (Ec. 3). Igualando dicha expresión con la ley de Hooke se obtiene la siguiente expresión $m \cdot a = -k \cdot x$ que da lugar a la ecuación

diferencial del movimiento. El signo negativo indica que la fuerza actúa en dirección opuesta al movimiento. Como la masa m y la rigidez k , son constantes para cualquier material dado, se puede observar que la aceleración a y la dislocación (o desplazamiento) x , son las únicas variables. O alternatively se puede observar que ambas son directamente proporcionales. Así, si la dislocación de la partícula (o el desplazamiento) aumenta, también lo hace su aceleración. Por otro lado, el tiempo que tarda una partícula en moverse y volver a su posición de equilibrio es independiente de la fuerza aplicada. Por tanto, dentro de un material dado, los recorridos a la misma velocidad no importan cómo se lleven a cabo siempre que la fuerza aplicada sea la misma y otras variables, como por ejemplo, la temperatura sea constante.

Influencia de las propiedades del material en la velocidad del sonido

El sonido viaja a distintas velocidades en materiales distintos. Esto se debe a que la masa de las partículas atómicas y las constantes elásticas son diferentes para cada material. La masa de las partículas se relaciona con la densidad del material, y la constante del resorte se relaciona con las constantes elásticas del material. La relación general entre la velocidad del sonido en un sólido y sus constantes elásticas viene dada por la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{\frac{C_{ij}}{\rho}} \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde V es la velocidad del sonido, C la constante elástica, y ρ la densidad del material. Esta ecuación puede tomar diversas formas dependiendo del tipo de onda (longitudinal o transversal) y de las constantes elásticas utilizadas. Las constantes del material más típicas son:

- Módulo de Young (E): Constante de proporcionalidad entre la tensión uniaxial y la deformación.
- Coeficiente de Poisson (ν): cociente entre el alargamiento longitudinal y el acortamiento de longitud en dirección perpendicular a la dirección de aplicación de la carga.
- Módulo de Bulk (K): Medida de la compresibilidad de un cuerpo sometido a presión hidrostática.
- Módulo a cortadura o cortante (G): también llamado rigidez a cortante, es una medida de la resistencia transversal del material.
- Constantes de Lamé (λ y μ): Constantes materiales derivadas del módulo de Young y del coeficiente de Poisson.

Al calcular la velocidad de una onda longitudinal, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson son las constantes más importantes. Al calcular la velocidad de una onda transversal, se utiliza el módulo a cortante.

También se debe mencionar, el subíndice ij de la constante C en la ecuación anterior utilizado para indicar la direccionalidad con respecto al tipo de onda y la dirección recorrida. En materiales isótropos, las constantes elásticas son iguales en todas las direcciones. Sin embargo, la mayoría de los materiales son anisótropos (como le

ocurre al material considerado en este proyecto) y las constantes elásticas varían según la dirección que se considere.

2.2.6 ATENUACIÓN DE LAS ONDAS

Cuando el sonido viaja en un medio, su intensidad disminuye con la distancia recorrida, como puede verse en la figura 7. En materiales ideales, la presión normal (amplitud de la señal) es reducida solamente por la extensión de la onda. En materiales naturales, sin embargo, muchos efectos producen un efecto para debilitar el sonido. Este debilitamiento de la señal es debido a dos causas básicas, dispersión y absorción (términos que se conocen en inglés con el nombre de *scattering* y *absorption*). El efecto combinado de la dispersión y de la absorción se llama atenuación.

La atenuación del sonido dentro de un material en sí mismo no tiene interés. Sin embargo, las características y condiciones de carga naturales se pueden relacionar con la atenuación. La atenuación sirve a menudo como herramienta para explicar fenómenos físicos o químicos, que expliquen como disminuye la intensidad ultrasónica.

La atenuación ultrasónica es el índice de decaimiento de radiación mecánica en la frecuencia ultrasónica que propaga a través del material. El decaimiento de una onda plana se puede expresar como:

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z} \quad [\text{Ec. 5}]$$

En esta expresión A_0 es la amplitud de la onda de la propagación en una cierta localización. La amplitud A es la amplitud reducida después de que la onda haya viajado una distancia z desde una localización inicial. El coeficiente α es la atenuación de la onda en la dirección- z . Las dimensiones de α son $1/\text{longitud}$, que multiplicado por z que tiene unidades de longitud hace que la exponencial sea adimensional.

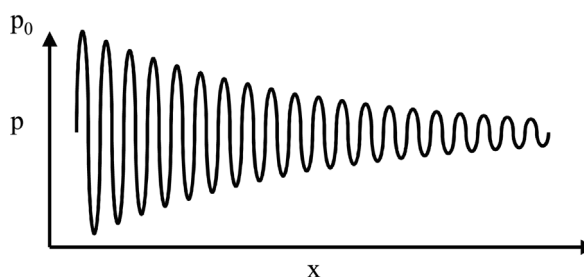


Fig. 7. Ejemplo de atenuación de la amplitud de una onda de presión.
Imagen tomada de [2].

La atenuación se puede expresar en dB por unidad de longitud (dB/m). Los decibelios son una unidad común para relacionar las amplitudes de dos señales.

La atenuación es generalmente proporcional al cuadrado de la frecuencia. Los valores normales de la atenuación se dan a menudo para una sola frecuencia, o un valor de la atenuación. A veces, se da un promedio sobre varias frecuencias. También, el valor real del coeficiente de atenuación para un material dado es altamente dependiente de la forma en la que el material ha sido fabricado. Así, los valores normales de la atenuación dan solamente una idea de la atenuación y no son exactos. Generalmente, un

valor aceptable de la atenuación sólo puede ser obtenido mediante determinación experimental.

2.2.7 IMPEDANCIA ACÚSTICA

El sonido viaja a través de los materiales bajo influencia de las ondas de presión. Debido a que las moléculas o los átomos de un sólido están unidos elásticamente unos con otros, la sobrepresión de unos con otros da lugar a una onda que se propaga a través del sólido.

La impedancia acústica (Z) de un material se define como, el producto de la densidad (ρ) por la velocidad característica del sonido (v) característica de ese material:

$$Z = \rho \cdot v \quad [\text{Ec. 6}]$$

La impedancia acústica es importante para:

1. La determinación de la transmisión y reflexión de las ondas acústicas en el límite de dos materiales que tienen distinta impedancia acústica.
2. El diseño de transductores ultrasónicos.
3. La determinación de la absorción del sonido en un medio.

La siguiente ecuación sirve para calcular la impedancia acústica de cualquier material, siempre y cuando se conozca su densidad (ρ) y la velocidad característica (v).

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad [\text{Ec. 7}]$$

NOTA: Ecuación basada en la hipótesis de que la suma de la energía transmitida más la reflejada es igual a la unidad.

2.2.8 COEFICIENTES DE REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN

Las ondas ultrasónicas se reflejan en los límites donde hay diferencias en la impedancia acústica, Z . Se habla comúnmente de la unión “mal hecha” como la transición entre materiales con diferentes impedancias. La fracción de ondas incidentes proporciona la intensidad de las ondas reflejadas porque se requieren altas velocidades de las partículas y grandes presiones locales en la partícula para continuar a través del límite entre los materiales.

En términos de porcentajes, se puede obtener la energía reflejada en función de la energía original. En la figura 8, la energía reflejada en el interfaz del acero con el agua representa el 0.88 o el 88%. El 0.12 o el 12% está siendo transmitido al material. La reflexión y transmisión en las intercaras sigue a través del componente, y despreciando la pérdida por atenuación, un pequeño porcentaje de energía original vuelve al transductor.

Se supone que la energía acústica en el transductor es el 100% y la energía transmitida en la intercara del acero y agua es del 12% según lo discutido anteriormente. En la segunda intercara (superficie trasera) del 12% sólo el 10.56% será reflejado y el 1.4% transmitido al agua. El interfaz final permitiría solamente el 1.26% del 10.56% de la energía original se transmitirá de nuevo al transductor.

Lógicamente para el caso de utilizar aire como medio acoplante, estos porcentajes se ven disminuidos.

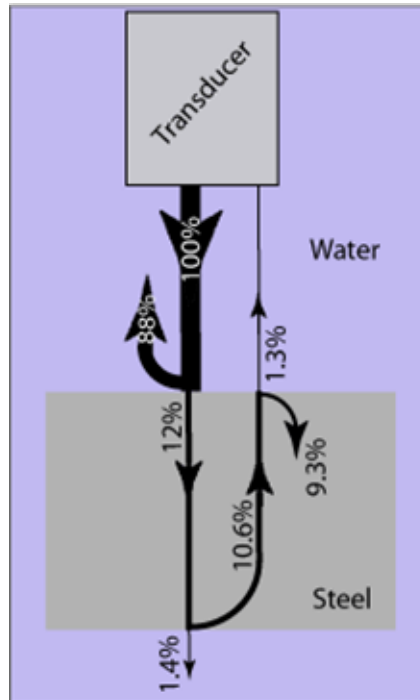


Fig. 8. Porcentajes de energía transmitida y reflejada para inspección inmersa en agua. Material inspeccionado acero. Imagen tomada de [1].

2.2.9 REFRACCIÓN Y LEY DE SNELL

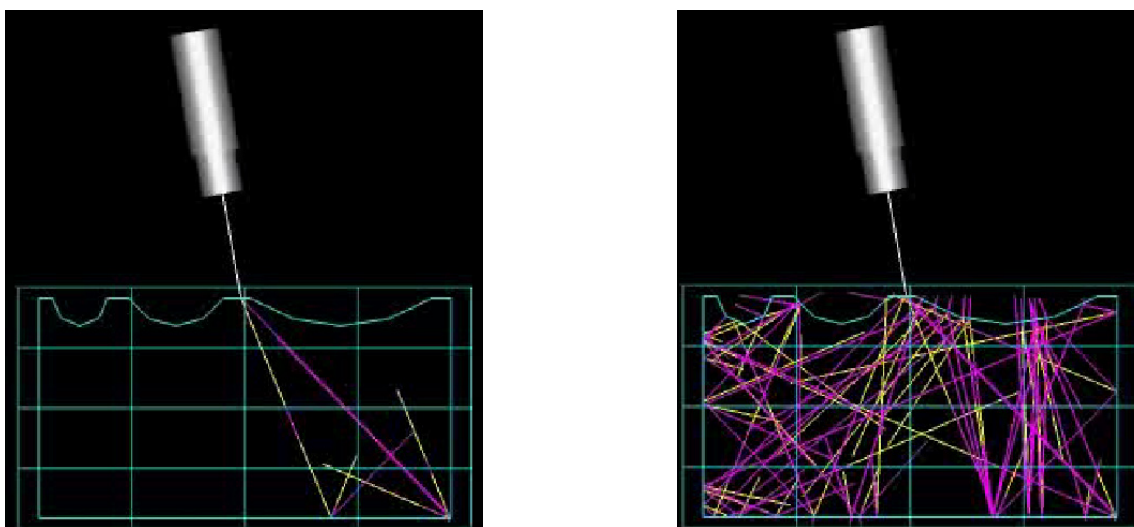
Cuando una onda de ultrasonido pasa a través de una interfaz entre dos materiales en ángulo oblicuo, los materiales que tienen diversos índices de refracción, producen ondas reflejadas y refractadas, como se observa en la figura 9. De la misma forma que ocurre con la luz.



Fig. 9. Fenómeno de refracción para un transductor ultrasónico. Imagen tomada de [1].

2.2.10 CONVERSIÓN DE MODOS

Cuando el sonido viaja en un material sólido, en forma de energía, la onda de una determinada forma se puede transformar en otra. Por ejemplo, cuando las ondas longitudinales golpean una interfase con un ángulo determinado, parte de la energía puede crear el movimiento de una partícula en dirección transversal y comenzar una onda en dirección transversal. Esta conversión de modos, ocurre cuando una onda encuentra una intercara entre materiales de diversa impedancia acústica y el ángulo de incidencia no es normal a la intercara. En las figuras 10 y 11 puede considerarse la conversión de modo cada vez que la onda encuentra una interfase con un ángulo determinado, las señales ultrasónicas pueden llegar a ser confundidas ocasionalmente.

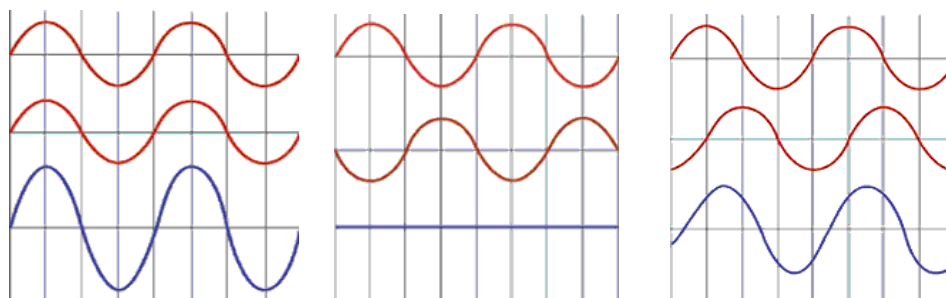


Figs. 10 y 11. Conversión de los modos de onda. Imagen tomada de [1].

2.2.11 INTERFERENCIA DE LAS ONDAS

El sonido que emana de un transductor de ultrasonidos no procede de un único punto, sino que se origina en muchos puntos a lo largo de la superficie del elemento piezoeléctrico. Esto implica un campo de sonido con muchas ondas interactuando o interfiriendo unas con otras.

Cuando las ondas interactúan, y se superponen unas con otras, la amplitud de la presión acústica o el desplazamiento de las partículas en cualquier punto de interacción es la suma de las amplitudes de las ondas. En primer lugar, vamos a considerar dos ondas idénticas que se originan desde el mismo punto. Cuando están en fase (de modo que los picos y los valles de una están exactamente alineados con los de la otra), se combinan para duplicar el desplazamiento de cualquier onda que actuara sola, como se muestra en la figura 12. Cuando están completamente fuera de fase (de modo que los picos de una onda están exactamente alineados con los valles de la otra onda), se combinan para cancelarse una a la otra, figura 13. Cuando las dos ondas no están completamente en fase o fuera de fase, la onda resultante es la suma de las amplitudes de onda de todos los puntos a lo largo de la onda, figura 14.



Figs. 12, 13 y 14. Ondas constructivas, destructivas y mixtas.
Imagen tomada de [1].

2.2.12 RADIACIÓN DE CAMPOS ULTRASÓNICOS

El sonido que emana de un transductor piezoeléctrico no procede de un único punto, sino que se origina en la mayor parte de la superficie del elemento piezoeléctrico. El campo de sonido típico de un transductor piezoeléctrico se muestra en la figura 15. La intensidad del sonido se indica por el color, los colores más ligeros indican una mayor intensidad.

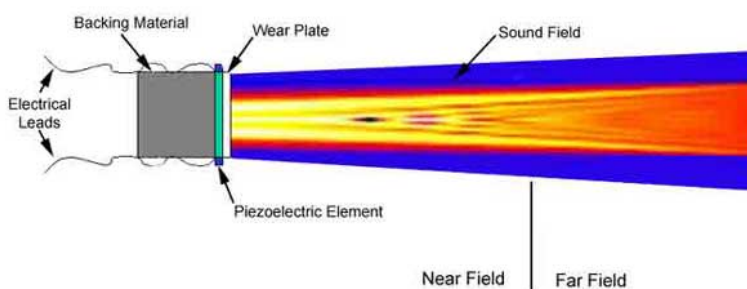


Fig. 15. Campo ultrasónico procedente de un transductor. Se puede observar además la distinción entre campo cercano y campo lejano. Imagen tomada de [1].

Dado que el ultrasonido se origina a partir de una serie de puntos a lo largo de la cara del transductor, la intensidad del ultrasonido se ve afectada por la construcción y la interferencia destructiva de ondas como se explicaba en el apartado anterior 1.2.11 sobre la interferencia de las ondas. A veces también se producen efectos de difracción. Esta onda de interferencia da lugar a amplias fluctuaciones en la intensidad de sonido cerca de la fuente y se conoce como campo cercano. Debido a las variaciones acústicas dentro del campo cercano, puede ser extremadamente difícil evaluar con precisión los defectos en los materiales cuando se colocan dentro de este campo. Las ondas de presión se combinan para formar un frente relativamente uniforme. El área más allá del campo cercano donde el haz de ultrasonidos es más uniforme se llama campo lejano.

En la figura 16, se puede observar el campo ultrasónico procedente de un transductor.

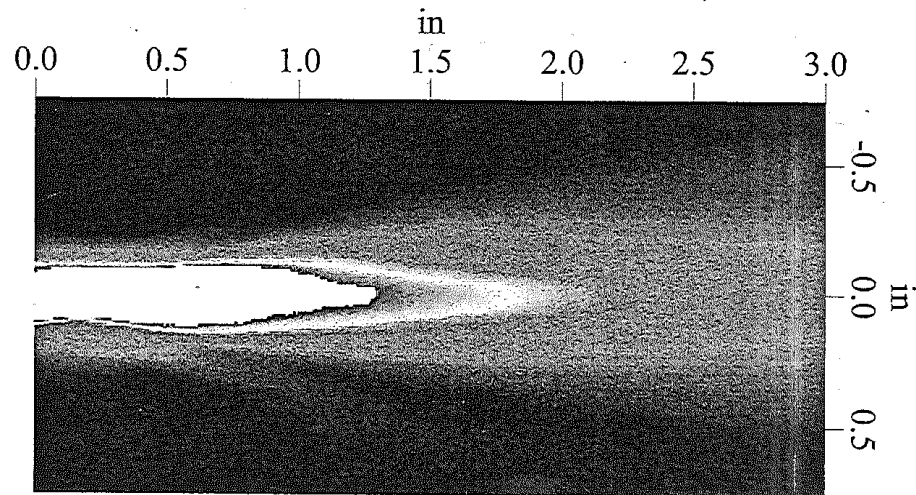


Fig. 16. Campo ultrasónico procedente de un transductor utilizado en los ensayos.
Imagen tomada de [3].

En el campo lejano, el haz se extiende con un patrón de origen desde el centro del transductor. La transición entre el campo cercano y el campo lejano se produce a una distancia, N , que a veces se denomina "natural" la cercanía o lejanía sobre el terreno a distancia, N , es significativo porque la amplitud de las variaciones que caracterizan el campo cerca de un cambio no tiene problemas de disminución de la amplitud en ese punto. El área más allá del campo cercano es donde las ondas de sonido están mejor y se comportan con su máxima fuerza. Por tanto, la detección óptima de los resultados se obtendrá cuando se producen fallos en esta zona, ver figura 17.

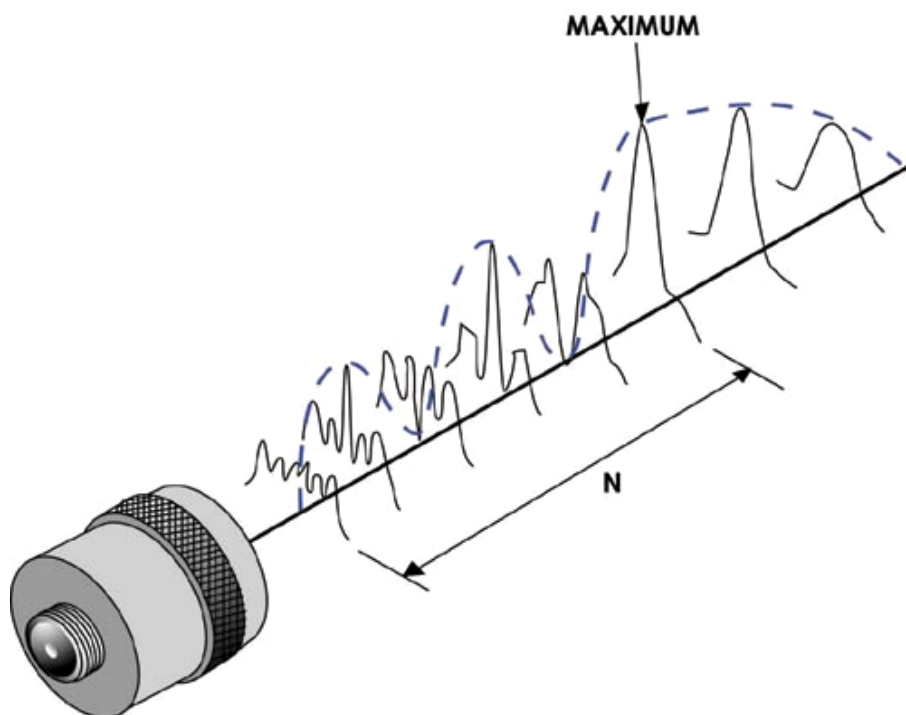


Fig. 17. Distancia N (natural) donde las ondas de sonido se comportan de forma óptima.
Imagen tomada de [1].

2.2.13 HAZ DE PROPAGACIÓN Y HAZ DE DIVERGENCIA DEL TRANSDUCTOR

El haz de propagación es una medida de todo el ángulo de un lado a otro del lóbulo principal del sonido en el campo lejano. El haz de divergencia es una medida del ángulo de un lado para el eje central del transductor en el campo lejano. Por tanto, el haz de propagación es el doble de la divergencia del haz. En la figura 18, podemos observar ambos haces.

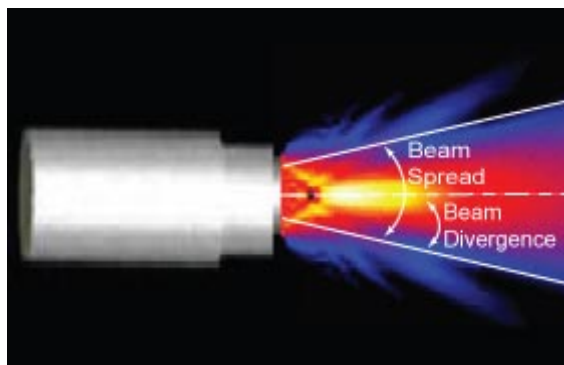
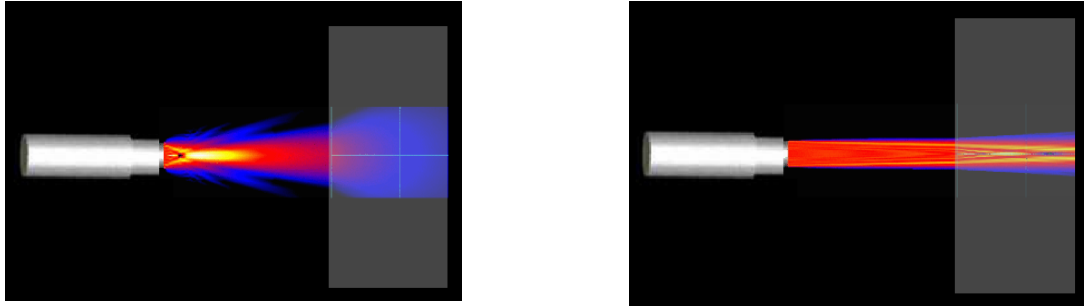


Fig. 18. Haz de propagación y haz de divergencia.
Imagen tomada de [1].

Aunque la propagación del haz debe ser considerado cuando se realiza una inspección ultrasónica, es importante señalar que, en el campo lejano, o en la zona *Fraunhofer* el máximo de presión sonora es siempre la acústica a lo largo del eje (central) del transductor. Por tanto, las reflexiones más fuertes son las que puedan provenir de la zona frontal del transductor.

El haz de propagación se produce porque la vibración de partículas del material (a través del cual la onda viaja) no siempre transfiere energía en la dirección de propagación de las ondas. Se recuerda que, las ondas se propagan a través de la transferencia de energía a partir de una partícula a otra en el medio. Si las partículas no están directamente alineadas en la dirección de propagación de las ondas, parte de la energía tendrá que ser transferida en ángulo. En el campo cercano, la interferencia de las ondas, constructivas y destructivas llenan el campo de sonido con fluctuaciones. Al inicio de la medida, sin embargo, el haz de fuerza es siempre mayor en el centro del transductor y disminuye cuando se propaga hacia el exterior.

El haz de propagación es determinado en gran medida por la frecuencia y diámetro del transductor. El *haz de propagación es mayor cuando se utiliza un transductor de baja frecuencia que cuando se utiliza un transductor de alta frecuencia*. Además si el diámetro del transductor aumenta, el haz de propagación disminuye, en las figuras 19 y 20, se puede observar este fenómeno.



Figs. 19 y 20. Haz de propagación empleando un transductor de 0,75" de diámetro, a la izquierda con una frecuencia de 1 MHz, a la derecha con una frecuencia de 8 MHz.
Imagen tomada de [1].

El ángulo del haz es una consideración importante para la selección del transductor por varias razones. En primer lugar, el haz de propagación disminuye con la amplitud de las reflexiones desde los campos de sonido menos concentrados y, por tanto, más débiles. En segundo lugar, el haz de propagación puede tener más dificultades en la interpretación de señales debido a las reflexiones en los lados laterales del objeto de la prueba u otras características fuera de la zona de inspección. La caracterización del campo de sonido generado por un transductor es un requisito previo para la comprensión de cualquier señal observada.

2.2.14 ACOPLANTE

El acoplante es un material que facilita la transmisión de energía por ultrasonidos desde el transductor a la probeta a inspeccionar. El acoplamiento en general es necesario por el gran desajuste de la impedancia acústica entre el aire y el sólido. Por lo tanto, casi todos los modos de la energía se reflejan y muy pocos se transmiten al material de prueba. El acoplante desplaza al aire y hace que sea posible obtener más energía racional en la muestra a fin de que pueda obtenerse una señal ultrasónica. En las pruebas de ultrasonidos por contacto generalmente se utiliza una fina capa de aceite, glicerina o agua en la superficie del ensayo, ver figura 21.

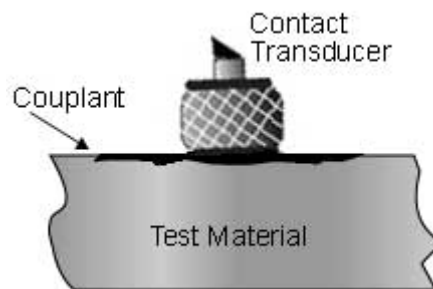


Fig. 21. Acoplante líquido entre el transductor de contacto y material.
Imagen tomada de [1].

Cuando se precisa hacer mediciones más precisas, la técnica de inmersión en agua ultrasonidos es utilizada con frecuencia. En las pruebas de ultrasonidos por inmersión en agua, tanto el transductor como la parte a inspeccionar están inmersos en el acoplante, que suele ser agua, tal y como muestra la figura 22.

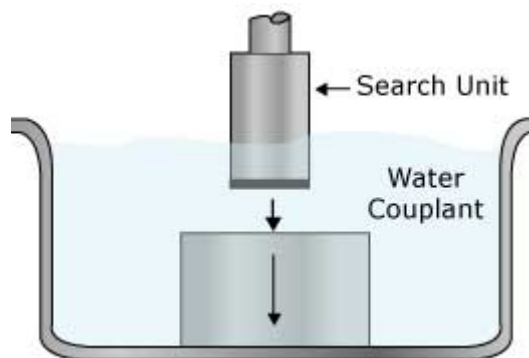


Fig. 22. Técnica de inspección por inmersión utilizando agua como acoplante.
Imagen tomada de [1].

En este proyecto, no se considera ninguno de los casos anteriores. En la inspección por ultrasonidos con acoplamiento de aire, es el propio aire el que actúa como acoplante.

2.2.15 LA PRESENTACIÓN DE LOS DATOS (A-SCAN, B-SCAN y C-SCAN)

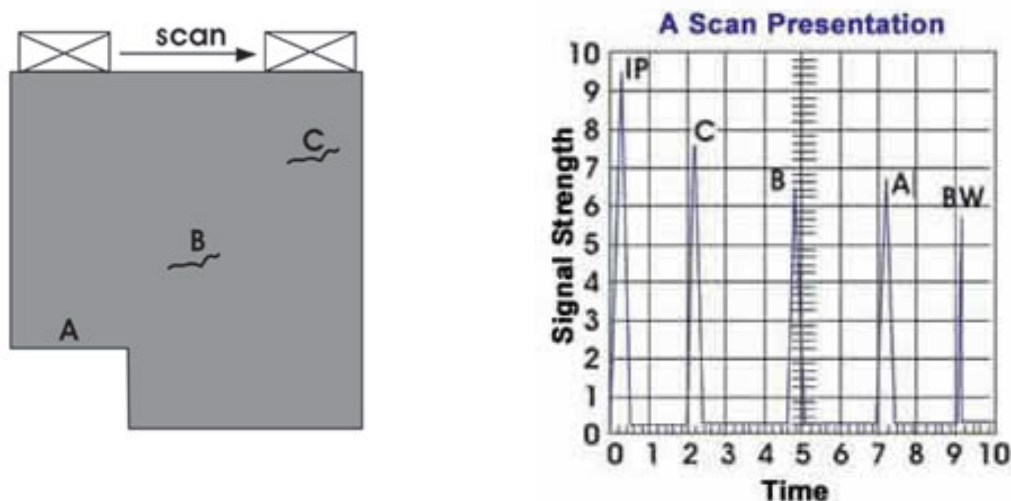
Los datos de ultrasonidos pueden ser recolectados y mostrados en diferentes formatos. Los tres formatos más comunes se conocen como A-scan, B-scan y C-scan. Cada modo de presentación proporciona una manera diferente de ver y evaluar la región de material que se esté inspeccionado. Los modernos sistemas computarizados de escaneo de ultrasonido pueden mostrar los datos en cada una de las tres formas de presentación al mismo tiempo.

- **A-scan**

La presentación *A-scan* muestra la cantidad de energía ultrasónica recibida como función del tiempo. La cantidad relativa de energía recibida se traza a lo largo del eje vertical y en el horizontal se representa el tiempo transcurrido. La mayoría de los instrumentos con *A-scan* permiten visualizar la señal en su forma natural de radio frecuencia (RF), como una señal de RF rectificada, o, bien como positiva o negativa la mitad de la señal de RF. En la presentación *A-scan*, la discontinuidad relativa del tamaño se puede estimar comparando la amplitud de la señal obtenida a partir de un reflejo desconocido, a partir de un reflejo conocido. La profundidad de la reflexión puede ser determinada por la posición de la señal en el barrido horizontal.

En las figuras 23 y 24 se muestra una muestra de referencia y una presentación *A-scan*, respectivamente. El impulso inicial es generado por el transductor. Cuando el transductor escanea a lo largo de la superficie, otras señales pueden aparecer en la pantalla. Cuando el transductor se encuentra en su posición en el extremo izquierdo, sólo la señal IP, refleja la energía de la superficie A, y se verá en el trazador de señal o pantalla. Como el transductor escanea hacia la derecha, una señal BW de fondo aparecerá más tarde en el tiempo, lo que demuestra que el sonido ha viajado más lejos para llegar a esta superficie. Cuando el error del transductor está más lejos de B, la señal aparecerá en el punto de la escala de tiempo aproximadamente a mitad de camino entre la señal IP y la señal BW. Desde el tiempo correspondiente a la señal de la superficie

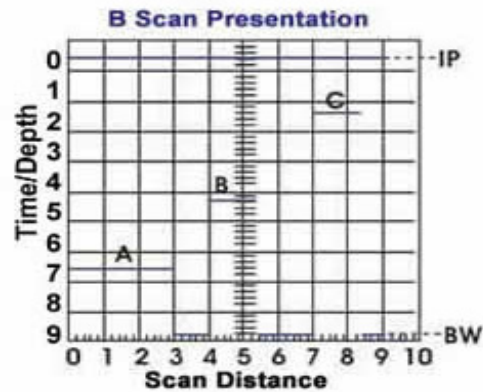
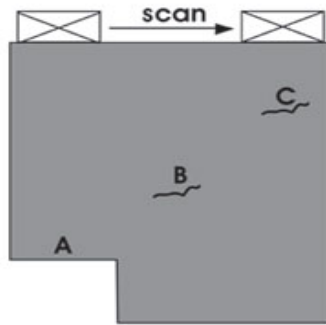
delantera e indica que el defecto B está a mitad de camino entre el anverso y el reverso de las superficies de la muestra. Cuando el transductor se mueve sobre el defecto C, la señal C aparecerá antes en el tiempo ya que el sonido recorre un camino más corto y la señal B va a desaparecer ya que el sonido ya no se refleja.



Figs. 23 y 24. A la izquierda, muestra de referencia para explicar la aparición de los defectos en la presentación *A-Scan*. A la derecha, presentación *A-Scan* de los defectos de la muestra que aparecen en la figura izquierda. Imagen tomada de [1].

- ***B-Scan***

Las presentaciones *B-scan* son una vista de la sección transversal de la muestra de la prueba. En el *B-scan*, el tiempo de viaje de la energía sonora se muestra a lo largo del eje vertical y la posición lineal del transductor se muestra a lo largo del eje horizontal. Con el *B-scan*, la profundidad de la reflexión y su aproximación de las dimensiones lineales en la dirección de barrido pueden ser determinadas. El *B-scan* es típicamente producido por el establecimiento de un disparador en la puerta *A-scan*. Siempre que la intensidad de la señal es suficiente para activar la puerta, se produce un punto en el *B-scan*. La puerta se activa por el sonido que se refleja el fondo de la muestra y por menores reflexiones en el material. En la imagen *B-scan* mostrada en la figura 26, la línea A se produce cuando el transductor escanea más de la reducción del espesor de la muestra. Cuando el transductor se mueve a la derecha de esta sección, aparece la línea de fondo. Cuando el transductor pasa por los defectos B y C, las líneas son similares a la longitud del defecto y las profundidades similares. Una limitación de esta técnica es mostrar defectos que pueden ser enmascarados por estar cerca de la superficie.



Figs. 23 y 26. A la izquierda, muestra de referencia para explicar la aparición de los defectos en la presentación *B-Scan*. A la derecha, presentación *B-Scan* de los defectos de la muestra que aparecen en la figura izquierda. Imagen tomada de [1].

- ***C-scan***

La presentación *C-scan* proporciona un tipo vista de la ubicación y el tamaño del defecto de la muestra a inspeccionar. El plano de la imagen es paralelo a la dirección de exploración del transductor. Las presentaciones *C-scan* se producen con un sistema automatizado de adquisición de datos, como un sistema de barrido controlado por un ordenador. Normalmente, una puerta de recopilación de datos está establecida entre la amplitud del *A-scan* y el tiempo de viaje de la señal registrada a intervalos regulares. La señal de amplitud o el tiempo de viaje se muestra como una sombra gris o de un color para cada una de las posiciones donde se registraron los datos. La presentación *C-scan* proporciona una imagen de características que reflejan y dispersan el sonido dentro y en las superficies de la muestra considerada, ver figura 27:

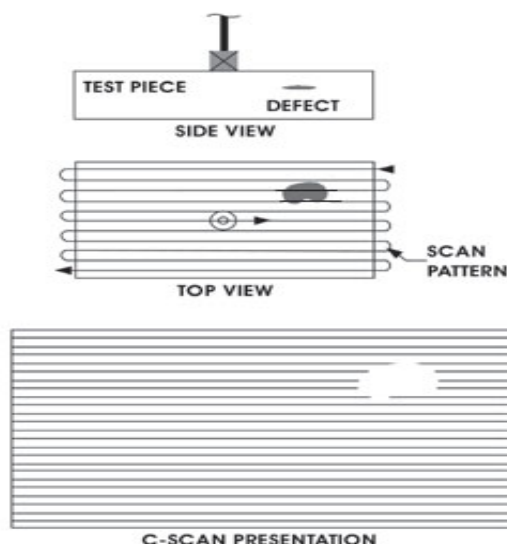


Fig. 27. Esquema explicativo representación *C-scan*. Imagen tomada de [1].

2.3 TÉCNICA ULTRASONIDOS CON ACOPLAMIENTO DE AIRE

Durante la década pasada los sistemas ultrasónicos con acoplamiento en aire han pasado de ser una curiosidad de laboratorio a tener un tremendo uso práctico, hasta el punto de ser una técnica viable para muchas inspecciones de fabricación, por ejemplo.

Con el equipo apropiado, es posible realizar inspecciones sensibles para defectos tales como vacíos, grietas o fisuras en una gran variedad de materiales. Esta técnica ha sido utilizada originalmente sobre todo para materiales compuestos aeroespaciales, los usos se han ampliado para cubrir una variedad de materiales donde los métodos convencionales de inspección no destructiva no se consideran adecuados.

Los diversos usos de sistemas por ultrasonidos por acoplamiento en aire incluyen maderas, espumas, materiales compuestos... Una gran variedad de frecuencias se pueden utilizar, permitiendo la optimización para la resolución o la penetración como con las técnicas de ultrasonidos “convencionales”.

La mayoría de usos de ultrasonidos con acoplamiento en aire han estado asociados a sistemas *C-scan* de un sólo canal. En este contexto se utiliza normalmente de forma sustitutoria a sistemas de inmersión en agua para examinar una gama más amplia de materiales generalmente con un procedimiento más simple.

El uso ha crecido más recientemente. Particularmente los sistemas de varios canales se han desarrollado permitiendo la inspección más rápida de grandes paneles compuestos a razón de 1 m² por minuto (velocidades excepcionales).

El desafío actual, es superar los requisitos para el alto poder de transmisión, desarrollando instrumentos portátiles de inspección. Esta tecnología se muestra como la considerable promesa a los problemas poco prácticos de las pruebas.

Cuando el sonido pasa a través de una interfaz entre dos materiales solamente una proporción del sonido se transmite, el resto del sonido se refleja. La proporción de sonido que se transmite depende de cómo de parecida es la impedancia acústica de los materiales. El agua es un acoplante bastante bueno para la mayoría de los materiales de uso general, por ejemplo alrededor de la mitad de energía sana se transmite típicamente en el interfaz entre agua y una lámina de carbono, por ejemplo. La exactitud de la medida depende del porcentaje de energía pérdida con respecto a la energía original, es decir depende del número de interfaces a pasar.

Inversamente si el sonido tiene que moverse entre la muestra y el aire (que tiene una impedancia acústica muy baja) solamente alrededor de un 1% de la energía sana se transmite. Así que, después de cuatro interfaces como en un material *sandwich* la energía sana es muy pequeña, típicamente la pérdida en la trayectoria total puede ser 100 dB mayor que usando el aire como acoplante que cuando se utiliza el agua. La pérdida de trayectoria es perceptiblemente más alta con metales, que tienen una alta impedancia acústica comparada con los plásticos que tienen impedancias más bajas.

Es por tanto evidente que, debemos trabajar cuidadosamente para minimizar las pérdidas en cada etapa si debemos alcanzar la señal/interferencia aceptable para nuestra inspección.

En resumen, un equipo *C-scan* en aire optimiza la relación señal/ruido y resolución en una aplicación particular, para lo que incluye la utilización de una electrónica resonante con procesamiento especial de señal, disparo con tren de pulsos ajustable, adaptación fina de señales de emisión y recepción, palpadores focalizados de banda ancha con capa específica para adaptación de impedancia acústica, preamplificador...

El equipo dispone de comunicaciones adecuadas para ser integrado fácilmente, sin requerimientos especiales, en sistemas automáticos con presentación *C-scan*. La sensibilidad y resolución intrínseca del sistema equipo–palpadores permite obtener resultados de inspección comparables a los habituales con sistemas de inmersión operando con frecuencias mucho menores y, por otro lado, suficientemente eficaces en inspecciones de materiales de elevada atenuación (sándwich con núcleos de foam, por ejemplo) que no son fácilmente inspeccionables con métodos convencionales.

El acoplamiento en aire es específicamente idóneo para la inspección de materiales cuando se requiere evitar su contaminación con agua o, cuando por lo delicado (integridad física) de éstos, no es admisible el contacto físico con palpadores rodantes, que dañan el componente objeto de la inspección.

2.3.1 EFECTOS DE LA FRECUENCIA

Las técnicas de ultrasonidos actúan típicamente con frecuencias entorno e inferiores a MHz, sobre todo con la transmisión sonora de aire se reduce, y más acusadamente, con las pérdidas por dispersión en muchos materiales llegan a ser inaceptablemente altas. Típicamente las pérdidas por dispersión aumentan con mayores frecuencias. Frecuencias típicas de inspección con aire se sitúan en 50, 120 y 400 kHz. Los resultados en diversas frecuencias se resumen en la tabla siguiente:

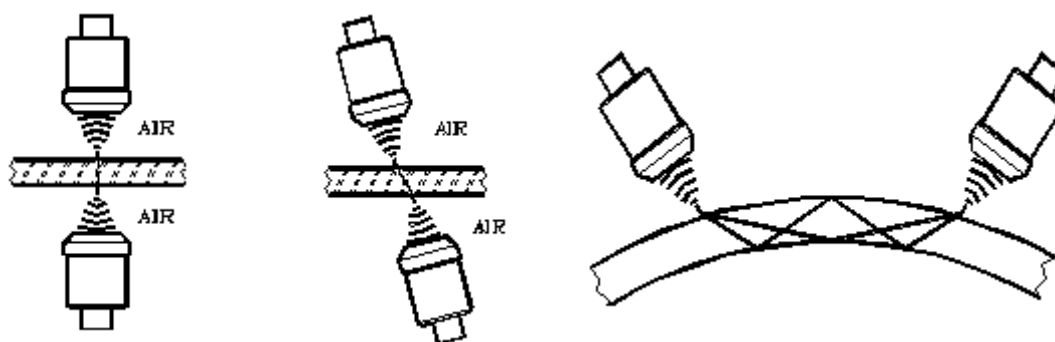
FRECUENCIA	RESOLUCIÓN TÍPICA DEL PUNTERO	MATERIALES TÍPICOS	COMENTARIOS
50 kHz	8-10 mm	Estructuras de espuma, compuestos de múltiples capas complejas, madera sin procesar ...	Penetrará casi cualquier cosa, pero la resolución es inadecuada para muchos propósitos.
120 kHz	5 mm	Paneles tipo sandwich con núcleo de espuma con 2 ó 3 capas, mampostería seca, madera de espesor medio-grueso...	Buen compromiso donde la resolución máxima no es requerida. Puede penetrar más en materiales convencionales.
400 kHz	1-2 mm	Láminas sólidas, paneles de una sola capa...	Da resultados comparables en resolución a pruebas de producción prácticas.

Tabla 2. Efectos de la frecuencia por ultrasonidos con acoplamiento de aire.
Adaptada de [4].

La mayoría de los trabajos utilizan frecuencias del transductor de 400 kHz, pero cada vez se están empleando frecuencias más bajas para inspeccionar materiales compuestos más complejos.

2.3.2 DIFERENTES CONFIGURACIONES PARA UNA INSPECCIÓN

Donde se requiere la proyección de la imagen exacta de defectos la configuración directa normal es la configuración más apropiada (figura 28), para el caso de acoplamiento de aire, aunque existen otras configuraciones que pueden resultar de utilidad (figuras 29 y 30).



Figs. 28, 29 y 30. Algunas de las configuraciones de inspección más típicas.
Imagen tomada de [4].

Como no hay acoplante húmedo las vibraciones superficiales, el acoplamiento del aire en comparación al agua se presta bien a la producción de ondas *lamb*.

2.3.3 APLICACIONES

Productos de madera

La industria de la madera fue la primera que empleó ultrasonido con acoplamiento de aire comercialmente. Los usos de ultrasonido con acoplamiento en aire se agrupan en cuatro grupos principales:

- Evaluación de la madera a granel para el decaimiento y los vacíos internos antes del proceso. Esto requiere una penetración extremadamente alta.
- Detección de delaminaciones y de grietas en productos de madera compuestos o procesados tales como tableros de madera aglomerada y madera presionada. Esto implica normalmente una cierta forma de exploración, aunque una sola línea de prueba sea a veces aceptable (ver figura 31). Usando una onda “*lamb*” puede ser posible probar la anchura entera de un tablero, permitiendo con eficacia la inspección al 100% .
- Evaluación de la calidad de madera midiendo la velocidad de la transmisión sonora.

- La inspección en servicio de los productos de la madera.

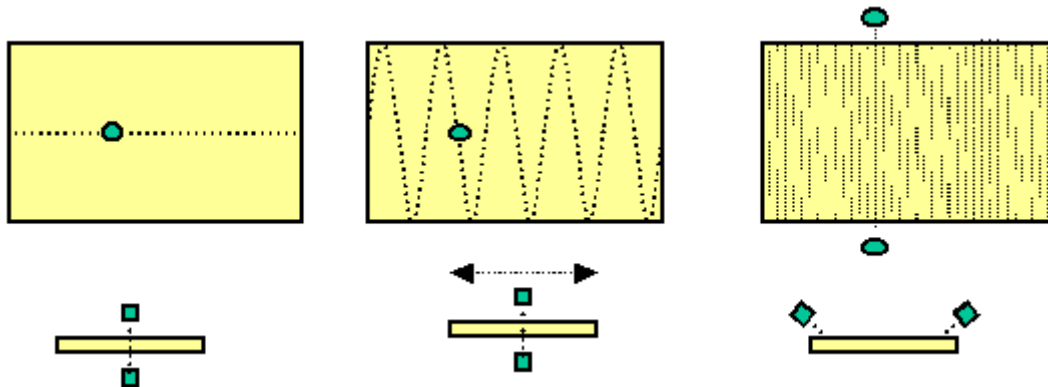
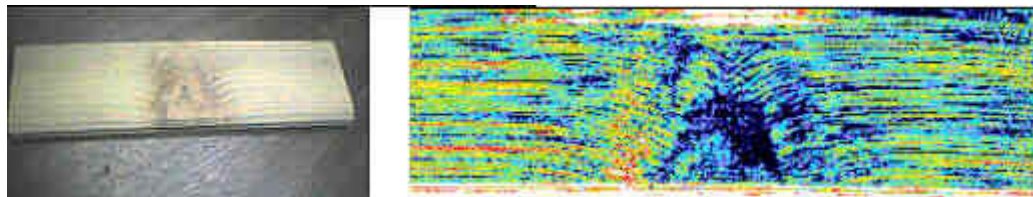


Fig. 31. Diversos acercamientos para la inspección de la madera. Imagen tomada de [4].

Se utilizan muchas y diversas configuraciones de alta frecuencia, y finos paneles de madera pueden ser utilizados, y la proyección de imagen extremadamente buena se puede obtener, tal y como se muestra las figuras 32 y 33.



Figs. 32 y 33. Comparación de fotografía y C-scan en madera. Imagen tomada de [4].

Materiales compuestos

Los materiales compuestos, y particularmente dentro de la industria aeroespacial, han sido un área primaria del uso para los métodos de prueba con aire acoplado. Las figuras 34, 35, 36, 37 y 38 están entre los ejemplos de resultados de la inspección de piezas compuestas:

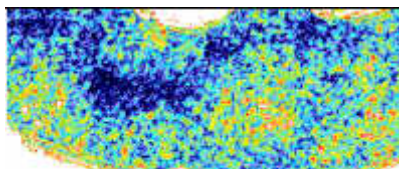


Fig. 34. Exploración de parte de un disco de freno de un avión.
Las áreas oscuras representan discontinuidades.
Imagen tomada de [4].

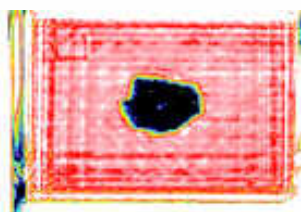


Fig. 35. Daño del impacto en un compuesto laminado de carbono. Imagen tomada de [4].

Fig. 36. Espuma metálica (test a 50 kHz).
Imagen tomada de [4].



Fig. 37. Exploración de una parte de un satélite
compuesto complejo (carbono/carbono y
carbono/panel). Imagen tomada de [4].

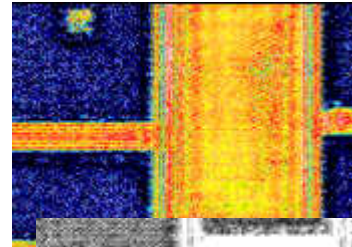


Fig 38. Como la figura anterior con un aumento más
alto para optimizar resultados en la sección del panel.
Imagen tomada de [4].



Con las C-exploraciones se obtienen resultados que son razonablemente familiares a los usuarios de técnicas de ultrasonidos convencionales, no obstante, muchas inspecciones pueden utilizar convenientemente una configuración de onda de placa, dando evaluaciones de gran calidad. Esto se ha aplicado particularmente a los compuestos extruidos.

Piezas de metal

La impedancia acústica extremadamente alta de metales, y los coeficientes de transmisión pobres para el sonido del aire, significa que los metales son generalmente candidatos pobres a la inspección con acoplamiento de aire, sin embargo, cuando otras circunstancias son favorables los resultados obtenidos pueden ser aceptables. Actualmente existen sistemas automatizados para examinar uniones en tubos de acero laminado fino para aplicaciones aeroespaciales.

3 ANTECEDENTES

La utilización de materiales tipo sándwich en materiales estructurales de alta responsabilidad como los utilizados en trenes, aviones o satélites y su verificación de estado, ha hecho desarrollar una técnica de inspección rápida, que no requiera manipular el material para inspeccionarlo. Estos materiales en servicio se encuentran sometidos a veces a impactos. Por tanto, conocer el tamaño del impacto o área dañada, puede resultar de elevada importancia, a veces el impacto incluso es invisible al ojo humano. En este contexto la técnica de inspección por ultrasonidos en aire constituye una de las alternativas más eficientes para la evaluación del material.

3.1 EL AIRE COMO MEDIO ACOPLANTE

Numerosos son los autores y las empresas, que estudian y trabajan, los ultrasonidos con acoplamiento de aire (en inglés, *air coupled ultrasounds*, ACU). En líneas generales trabajar con acoplamiento en aire tiene muchas ventajas pero también muchas desventajas. Entre las ventajas principales se puede destacar, no es necesario introducir el material en agua, que en ocasiones implica sellar la probeta de inspección con silicona por ejemplo, ni aplicar ningún material como medio acoplador. Pero en contra, presenta muchas desventajas, la principal desventaja puede ser que el coeficiente de transmisión del aire al aluminio según *David K. Hsu et al.* [5], del *Center for Nondestructive Evaluation* de la *Iowa State University*, es del 0.01% que si se compara con el del agua en aluminio es del 30 %, lo que confiere una idea de la sensibilidad a utilizar y de la meticulosidad de los ajustes que se deben utilizar cuando se utiliza el aire como medio acoplador. Además de los inconvenientes que presenta la inmersión en agua como son la presencia de burbujas.

Teniendo en cuenta la poca transmisibilidad que hay cuando se utiliza acoplamiento de aire hace desear que la atenuación de la onda sea la mínima posible. Adicionalmente considerando el estudio sobre transductores realizado por *Gómez et al.* [6], donde se concluye que la atenuación a altas frecuencias es mucho mayor que a frecuencias mas bajas, convence que, para utilizar acoplamiento en aire se necesita utilizar transductores con frecuencias típicas del orden de kHz, y no del orden de MHz como típicamente se usan en otras inspecciones ultrasónicas (como la inmersión en agua). A continuación se puede observar una gráfica extraída del estudio de los autores anteriormente mencionados:

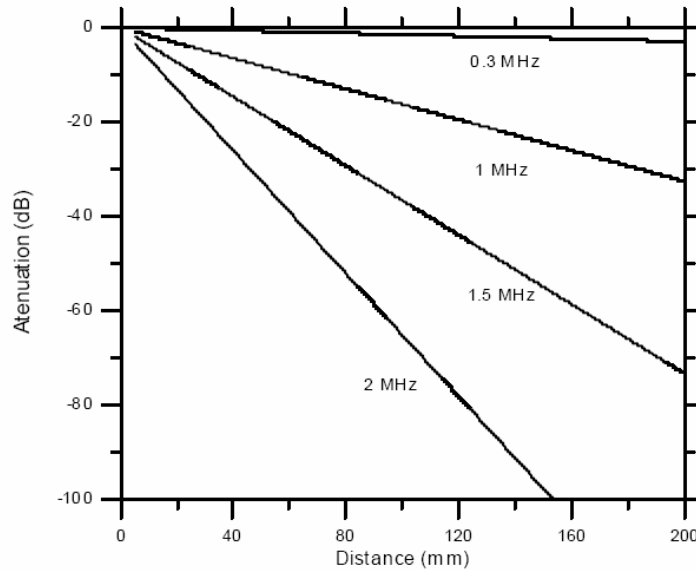


Fig. 39. Atenuación del ultrasonido en función de la distancia para diversos transductores.
Imagen tomada de [6].

Además, años antes, en el 2002, *E. Blomme et al.* [7], ya pusieron de manifiesto el uso de frecuencias en el rango de 0.05-5 MHz para el uso de sistemas ultrasónicos con acoplamiento de aire.

El sistema de inspección por ultrasonidos en aire que se utiliza en los ensayos cuenta con varios transductores transmisores y receptores en el rango de las frecuencias de kHz, en concreto, tenemos transductores de 50 kHz, 120 kHz, 225 kHz y 400 kHz.

La señal del osciloscopio para un material compuesto de carbono y para una frecuencia de 200 kHz, según *David K. Hsu* en [8], debería ser como se presenta en la figura siguiente, figura 40:

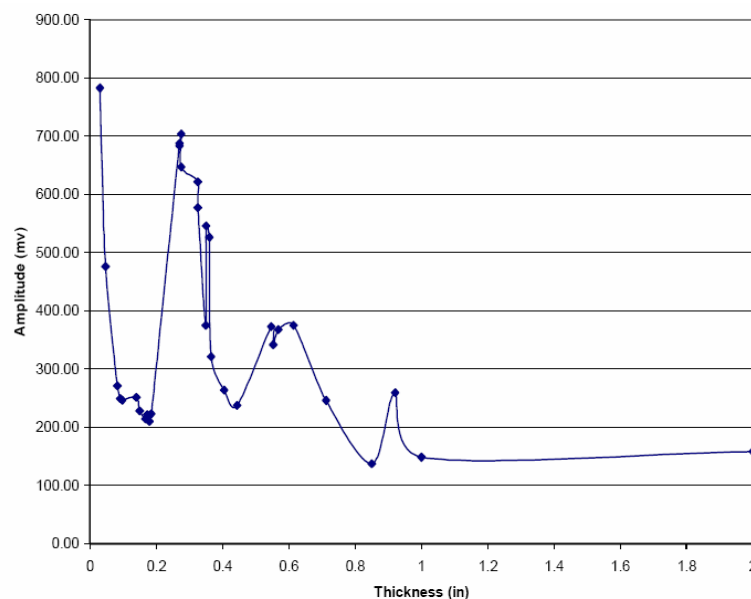


Fig. 40. Amplitud del ultrasonido transmitido en aire en función del espesor de material compuesto de carbono, usando un transductor con frecuencia central de 200 kHz. Imagen tomada de [8].

La figura 40 encaja perfectamente con el manual del equipo [3], dónde se recomienda realizar inspecciones de material compuesto tipo sándwich con núcleo *honeycomb* de aluminio, obtener señales como la presentada en la figura 41:

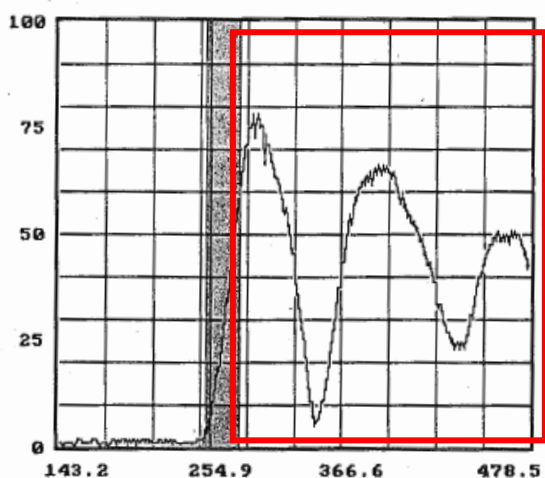


Fig. 41. Señal a obtener en pantalla para material compuesto tipo sándwich con núcleo honeycomb.
Imagen tomada de [3].

Los usuarios de técnicas ultrasónicas han reconocido durante muchos años que para algunos usos la presencia de agua es indeseable o poco práctica (hay que sumergir las probetas, sellarlas con silicona...), y que sería más conveniente usar el aire como medio acoplante.

Durante los años 70 los sistemas de acoplamiento de aire, se utilizan para algunos usos tales como la inspección de los productos de madera y de neumáticos usados. Sin embargo, todos estos usos fueron limitados seriamente por la tecnología disponible en el momento, causando compromisos indeseables en términos de sensibilidad, penetración y resolución.

Hacia finales de los años 80 el trabajo llevado a cabo por *Chris Fortunko et al.* según se expone en [1] ha conducido al desarrollo de transductores ultrasónicos enfocados a frecuencias medias. Esto significó que las técnicas de aire por acoplamiento en aire podrían, por lo menos para algunos casos, dar resultados comparables a los de ultrasonidos “convencionales” por inmersión en agua, así podrían convertirse en parte de las herramientas aceptadas por las técnicas de evaluación no destructiva dejando de ser una curiosidad especializada.

Ahora bien, la pérdida de energía sana es mucho mayor en el caso de utilizar aire, como acoplante que usando agua o glicerina, experimentalmente se ha comparado las pérdidas en el caso de usar agua o aire. En las figuras 42, 43 y 44, se pueden observar algunos de los resultados obtenidos.

En esta figura 42, se puede observar la pérdida de amplitud de la señal en una exploración para un material compuesto (similar al usado en los ensayos de laboratorio) en función se use agua o aire como acoplante.

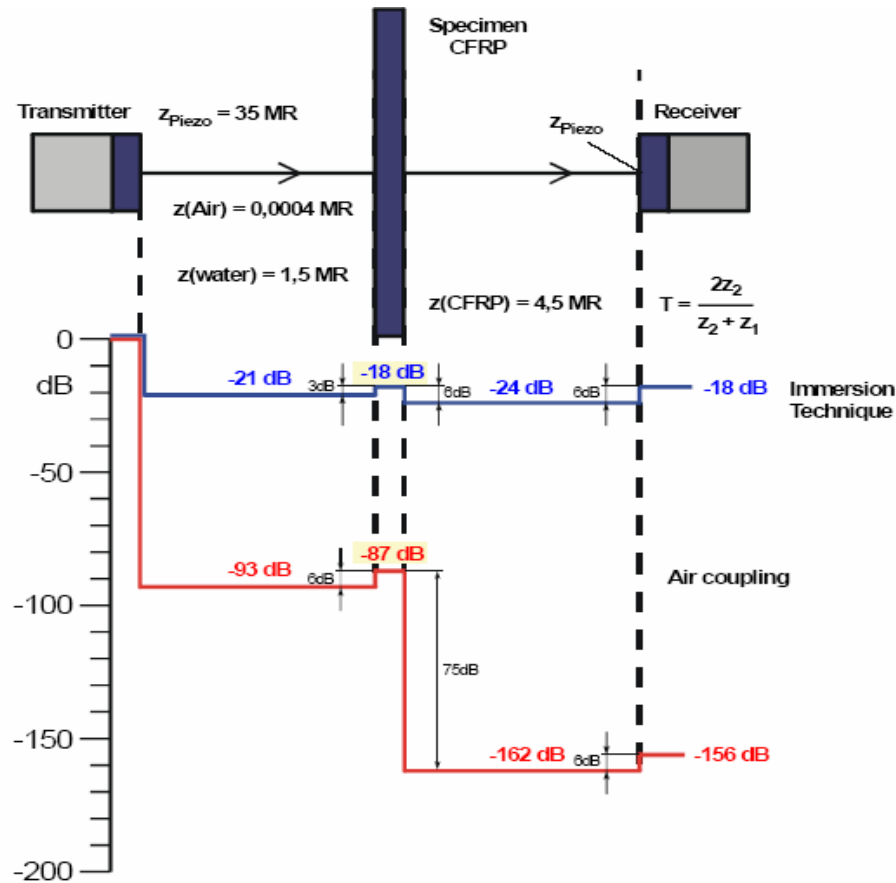
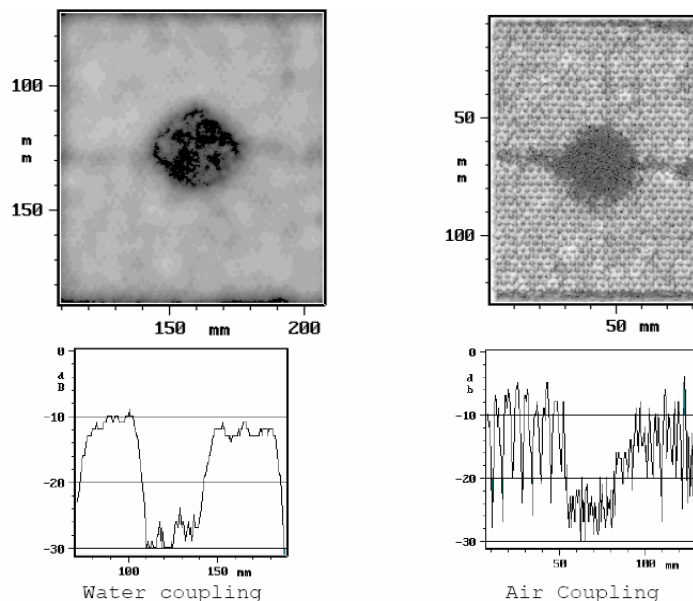


Fig. 42. Pérdida de amplitud en la señal recibida en función de las zonas atravesadas y en función del acoplante. Imagen tomada de [1].

Además, en el caso del aire, si se configura de forma correcta el equipo, es posible obtener mejores resoluciones en las imágenes, tal y como se puede observar en las figuras 43 y 44.



Figs. 43 y 44. Imagen C-scan usando agua (a la izquierda) o aire (a la derecha) como medio acoplante y señales observadas en el osciloscopio. Imagen tomada de [1].

3.2 APLICACIONES DE LA TÉCNICA EN MATERIALES COMPUESTOS TIPO SANDWICH

En el desarrollo de este proyecto se analizará el área dañada de varias probetas previamente impactadas, autores como *T. Mitrevski et al.* [9], han analizado mediante la técnica de C-scan la influencia que tiene la forma del impactor, en las probetas impactadas.

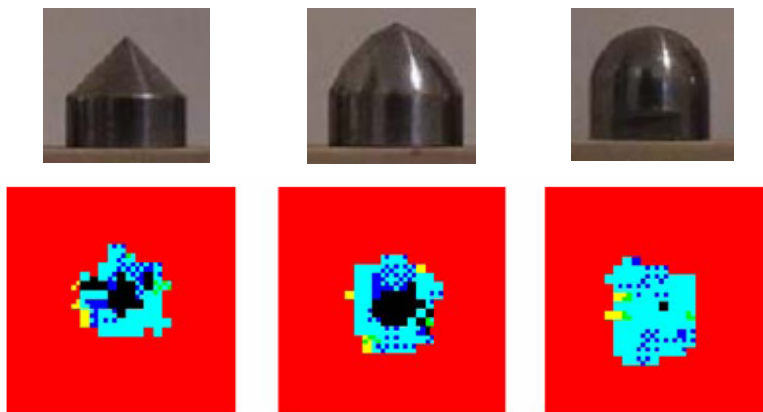


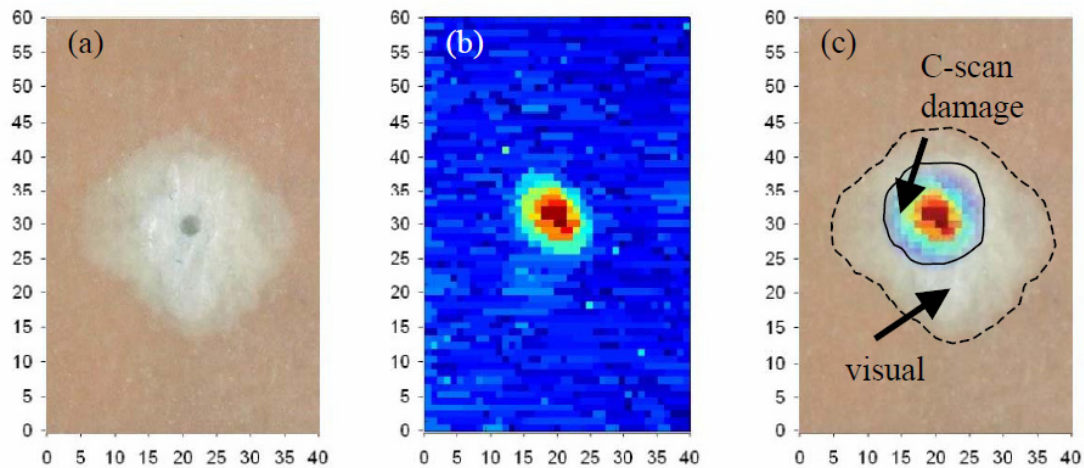
Fig. 45. Distintos proyectiles y sus imágenes por C-scan asociadas. Imagen tomada de [9].

Obteniendo resultados que dependen de la forma del proyectil empleado. Concluyendo que, para la misma energía de impacto 4 J, y para el mismo diámetro de proyectil (12 mm). Se obtienen mayores áreas dañadas para el caso del proyectil con punta semiesférica.

Otros autores han analizado la influencia del tipo de material en los resultados del *Airscan*. En realidad, no todos los materiales compuestos se comportan de la misma forma cuando son examinados con la técnica de ultrasonidos con acoplamiento de aire, determinados materiales se inspeccionan mejor que otros. En concreto, las fibras vidrio (GFRP) se inspeccionan peor que las fibras de carbono (CFRP). Esto se debe fundamentalmente a que ecos intensos se reflejan cerca de las fibras de vidrio, estos ecos coinciden con la frecuencia de los ecos que provienen de los defectos reales. Este fenómeno no sucede en el caso de las fibras del carbono. No sólo eso, sino que, el mismo defecto puede ser detectable para en material CFRP y no ser detectable en absoluto para GFRP. Esto hecho fue estudiado y demostrado por *Hasiotis et al.* [10].

En líneas generales, se puede observar como la técnica de inspección por ultrasonidos en aire, representa un método bueno con alta resolución y capaz de obtener profundidades de los defectos, pero no es método muy recomendable para aplicaciones industriales. En este sentido, *Kisoo Kang et al.* [11], concluyen que existen otras técnicas de inspección no destructivas como la termografía y el láser ESPI que tienen alta sensibilidad de medición y la simplicidad relativa del uso en comparación con el *Airscan*, que son mucho más cercanas a la realidad y más aptas para aplicaciones industriales. Sin tener en cuenta otros factores como costes o tiempos de inspección.

Por último, para algunos materiales tipo sándwich, en concreto para material tipo sandwich con pieles de fibras de vidrio, y núcleo espuma de PVC los resultados del *C-Scan* obtienen áreas dañadas menores que lo que se pueda observar a simple vista según concluyen *Tomasz Lendze et al.* [12], en las figuras 46, 47 y 48, se puede observar las imágenes de este estudio:



Figs. 46, 47 y 48. Área dañada observada por *C-scan* y visualmente.
Imagen tomada de [12].

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 MATERIAL

Las probetas de fibra de carbono/resina epoxi y núcleo de panel de abeja de aluminio, fueron configuradas como se presenta a continuación en la figura 49.

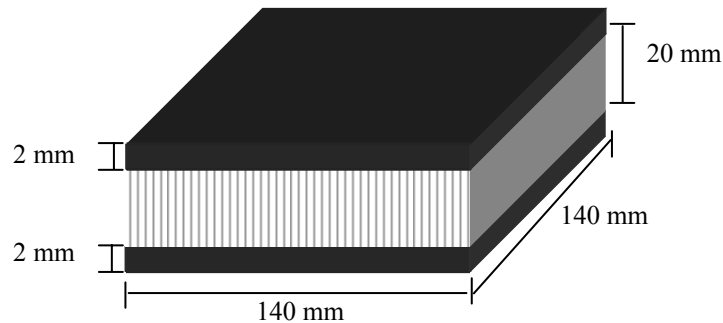
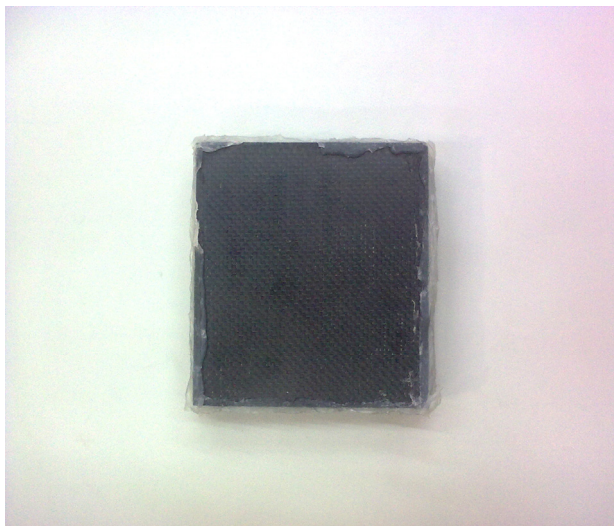


Fig. 49. Geometría de las probetas de fibra de carbono/resina epoxi/núcleo panel de abeja de aluminio

Las pieles del sándwich son de 2 mm de espesor cada una, y el núcleo del sándwich de 20 mm de espesor, lo que implica un espesor total de 24 mm.

Formando una estructura sándwich fabricada con pieles de laminado de fibra de carbono reforzado con matriz de resina de tipo epoxi y núcleo de panel de abeja fabricado en aluminio, en la figura 50 se muestra una vista frontal y en la figura 51 una vista lateral de una de las probetas usadas en los ensayos.



Figs. 50 y 51. Vista frontal y vista lateral de una de las probetas utilizadas en el desarrollo del proyecto.

Las propiedades mecánicas de cada uno de los elementos se muestran a continuación en las tablas 3, 4 y 5.

Propiedades	Valor
Densidad (Kg/m^3)	1790
E1 (GPa)	141
E2 (GPa)	10
Xt (MPa)	2207
Yt (MPa)	781
Xc (MPa)	1531
S (MPa)	114

Tabla 3. Propiedades de la fibra de carbono. Fuente [13].

Donde

E1: representa el módulo de Young o módulo de elasticidad para cargas aplicadas en forma paralela a las fibras unidireccionales.

E2: representa el módulo de Young o módulo de elasticidad cuando se aplican en cargas en dirección perpendicular a las fibras.

Xt: resistencia a tracción en la dirección X (dirección paralela a las fibras).

Yt: resistencia a tracción en la dirección Y (dirección perpendicular a las fibras).

Xc: resistencia a compresión en dirección X (dirección paralela a las fibras).

S: resistencia a cortante del plano XY con las consideraciones anteriores.

Propiedades	Valor
Densidad (Kg/m^3)	1300
Resistencia a tracción (MPa)	206 - 216
Resistencia a flexión (MPa)	176 - 216
Modulo de elasticidad (GPa)	24,5
Contracción lineal (%)	0,02
Coef. de exp. térm. lineal ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$35 \cdot 10^{-6}$

Tabla 4. Propiedades de la Resina epoxi. Fuente [13]

El núcleo esta formado por celdas hexagonales, tipo nido de abeja, compuestas de aluminio cromado tipo 3003 AlMnCu, cuyas propiedades se indican a continuación en la tabla 5.

Propiedades	Valor
Espesor de la lámina (μm)	60
Tamaño de celda nominal (μm)	4.8
Densidad nominal (Kg/m^3)	77
Resistencia a compresión (N/mm^2)	3.94

Tabla 5. Propiedades del núcleo de panel de abeja de aluminio. Fuente [13]

4.2 EQUIPO DE INSPECCIÓN

Para entender cómo funciona el sistema de inspección por ultrasonidos es necesario tener una idea de los componentes fundamentales del mismo. En la figura 53 se puede observar las partes fundamentales del sistema de inspección:

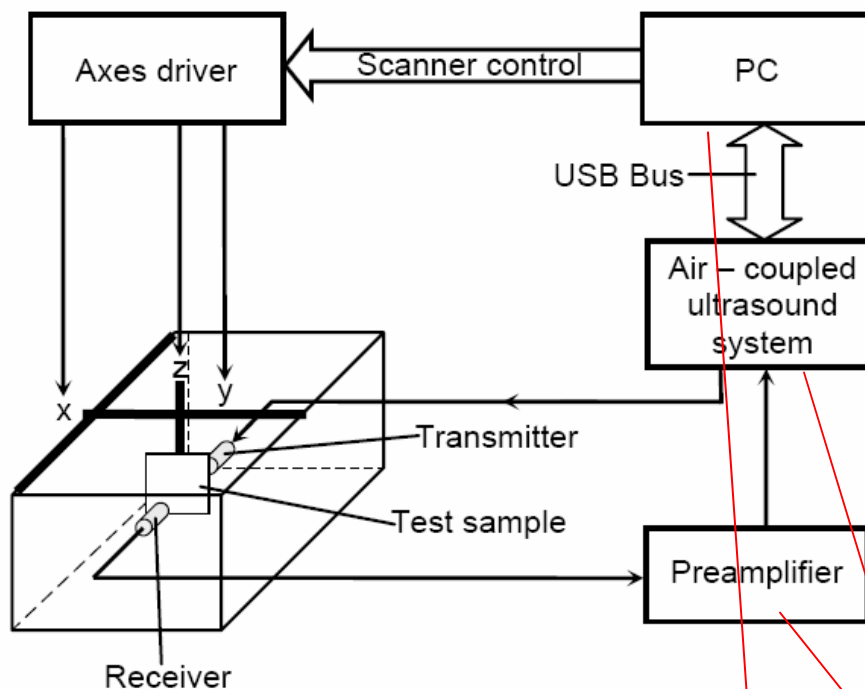


Fig. 53. Diagrama de bloques del sistema experimental. [14]



Fig. 52.
Sonda 007CX



Fig. 54. PC de adquisición de datos y Sonda 007CX.

En líneas generales, el funcionamiento es el siguiente, un PC controla los ejes de un sistema de inspección, además es capaz de memorizar movimientos, posicionamientos y velocidades de los mismos, mediante un software especializado.

Los brazos se accionan y controlan por el PC, portan dos transductores, uno emisor y otro receptor. El emisor manda ultrasonidos, y el receptor recibe éstos, parcialmente atenuados. Estas variaciones de la señal emitida/recibida, con un control adecuado de señal/ruido, se amplifican y posteriormente se procesan por un software capaz de representar estas variaciones en un código de colores en una pantalla, ya que la sonda está en conexión con el PC. Luego, toda discontinuidad en el material si es captada por el receptor aparece fielmente representada en pantalla. Siempre y cuando, todos los parámetros de inspección estén debidamente configurados. Es posible que en las primeras inspecciones, hasta que se configure adecuadamente el equipo se obtenga imágenes totalmente negras o malos resultados. En general, existen configuraciones muy “amigables” de colores como la típica roja/azul/verde, o la típica blanco/negro. En función de los dB que se reciben el software asigna un color u otro.

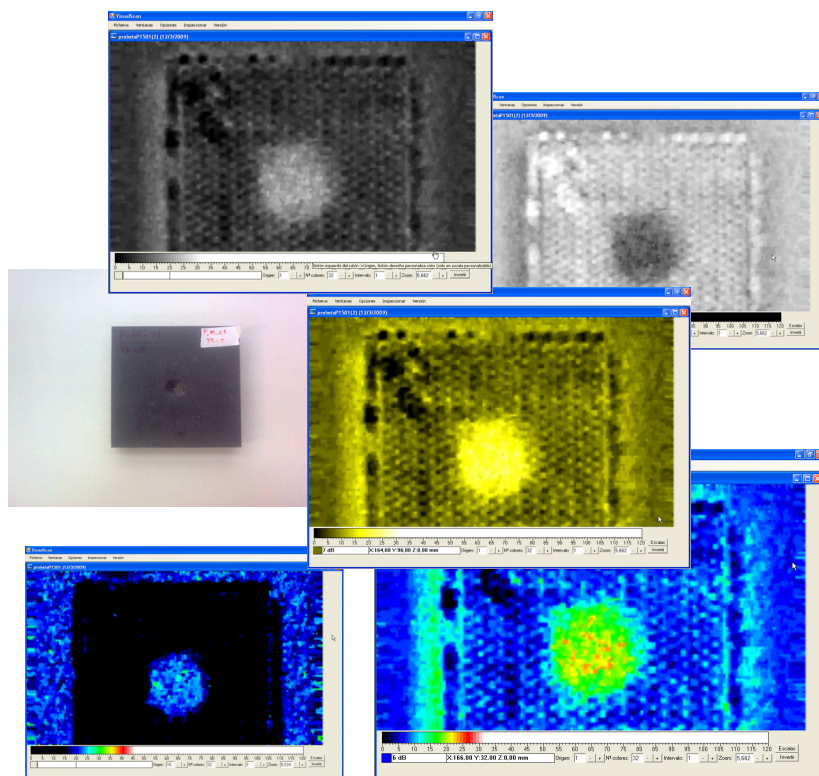


Fig. 55. Diferentes configuraciones de colores para la misma probeta.
Imágenes conseguidas por el autor.

Existe un generador de señal y un osciloscopio, que funcionan de manera conjunta y en paralelo al PC, este subsistema es conocido comúnmente como “sonda”. Este aparato se encarga de generar señales que el transductor de ultrasonidos emisor, transforma en pulsos que son recibidos en el receptor, se envían de nuevo a la sonda, y los datos son procesados en el PC, y se crea una imagen de acuerdo a un código de colores, en función de la variación de la señal recibida.

4.2.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS SONDA 007CX

En este punto se detallan las características técnicas de la *Sonda 007CX*.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
TRANSMISOR-RECEPTOR	Bipolar toneburst de hasta 15 ciclos por explosión. Ajuste fino para frecuencias de 50, 120, 225 y 400 kHz. Transductor - Receptor con preamplificador de bajo ruido con ganancia de hasta 60 dB.
DISPLAY	Monitor A - RF de 7"
CONTROLES DEL PANEL FRONTAL	Ganancia, Puerta, Rango, Atenuación, Ciclo de transmisión, Alarma independiente del control del transmisor y receptor, y funciones de archivo.
CONTROL DIGITAL	Embebido en el PC.
PANEL TRASERO	Línea de alimentación con fusible intercambiable, Analógico DC y salidas RF. TTL disparador IN & OUT, TTL de Alarma. Conector RS-232. Conector adicional para conectar una pantalla adicional.
REQUISITOS DE POTENCIA	110-120 V AC, 5A / 220 V AC, 2.5 A
RANGO DE TEMPERATURAS	- 20 a 100 °F (-28.8 a 37.8 °C)
DIMENSIONES	14.375" (largo) x 14.375" (ancho) x 5.75" (alto) Peso: 19.5 lb
CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA	La SONDA-007CX® se puede usar: - En todas los sistemas de exploración QMI. - Sistemas existentes de exploración en agua. - Software de adquisición de datos y control de movimiento de ejes.
ACCESORIOS	AS50Ai 50kHz Airscan Transductor AS120Ai 120kHz Airscan Transductor AS225Ai 225kHz Airscan Transductor AS400Ai 400kHz Airscan Transductor

Tabla 6. Características técnicas *Sonda 007CX*. Datos tomados de [3].

4.2.2 TRANSDUCTORES

Los transductores ultrasónicos normalmente operan en frecuencias comprendidas entre 500 kHz y 100 MHz, aunque con acoplamiento de aire se utilizan frecuencias más bajas (de hecho el equipo del que se dispone en laboratorio, cuenta con transductores de 50 kHz, 120 kHz, 225 kHz y 400 kHz, en las figuras 56 y 57 podemos ver algunos de ellos), por medio de transductores piezoeléctricos se generan ráfagas de ondas de sonido originadas por impulsos eléctricos. Existe una amplia variedad de transductores con diversas características acústicas para satisfacer las necesidades de las aplicaciones industriales. Por lo general, la disminución de frecuencias se utiliza para optimizar la penetración en la medición del espesor, en materiales muy atenuantes o muy dispersivos, mientras que las frecuencias más altas se recomiendan para optimizar la resolución en materiales de espesor delgado, no atenuantes y no dispersivos.



Fig. 56. Transductores del *Airscan* (a la izquierda 120 kHz, a la derecha 50 kHz).
En azul, emisores. En rojo, receptores.



Fig. 57. Transductores de 225 kHz durante una inspección.

4.3 SOFTWARE UTILIZADO EN LAS INSPECCIONES (SETUP SCAN / VISUAL SCAN)

Al iniciar INICIO.EXE se nos presenta el siguiente cuadro:



Al iniciar una inspección se selecciona Configuración Inspección / Ultrasonidos (SETUP SCAN), se obtiene el siguiente cuadro:

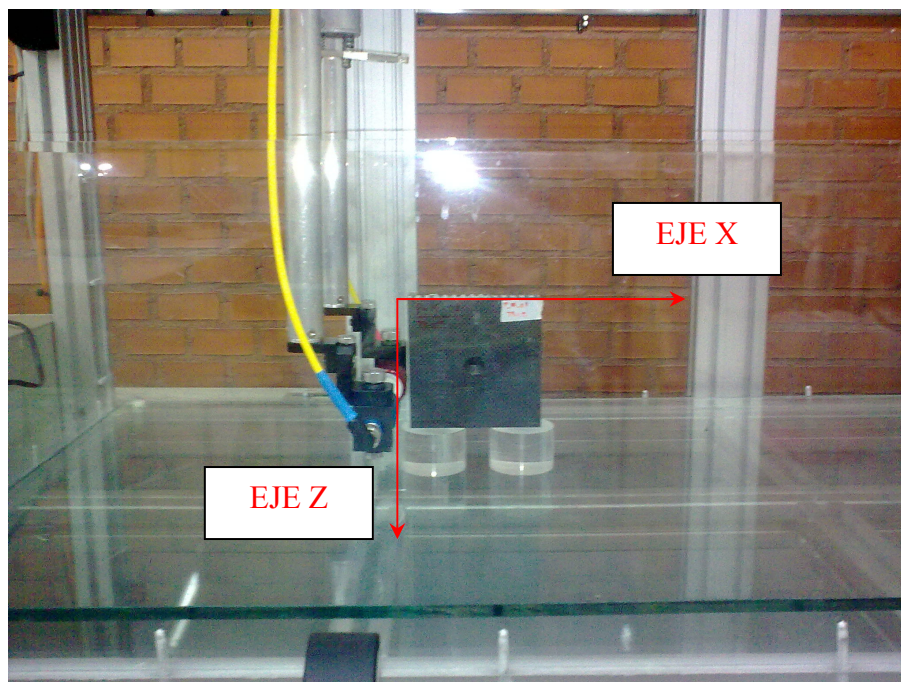


Figs. 58 y 59. Vistas del software empleado.

Este menú es compartido con el equipo de inspección por ultrasonidos tanto en agua como en aire. Básicamente se tienen las siguientes opciones, el movimiento de ejes permite situar al brazo robotizado que porta al transductor (caso de agua) o transductores (caso de aire), el cuadro origen sitúa el origen de los 3 ejes, eje X, eje Y y eje Z; el desplazamiento permite posicionar los transductores donde se desee sin mas que pinchar sobre las flechas, y las flechas de velocidad que indican las velocidades a

las que se pueden mover los ejes para producir los desplazamientos correspondientes. Resulta ser un menú muy intuitivo. Luego, a la derecha del cuadro movimiento de ejes se tiene un cuadro donde se muestra el modelo de equipo de ultrasonidos y el canal activo. En la parte inferior derecha se tienen dos botones que sirven para delimitar el cuadrilátero de inspección, sin más que fijar los vértices opuestos y se mostrarán sus respectivas coordenadas, luego hay una opción de eje *index*, que indica al eje produce el paso de la inspección, bien el Y o bien el Z (normalmente el eje Z). Por último, existe la opción de salvar la configuración, se puede dar un nombre con extensión .bar, esta opción es importante, ya que el módulo de inspección por aire recurre a ésta. Además, en la parte inferior izquierda se tiene un mapa que delimita las zonas de inspección fijadas o salvadas anteriormente.

Para entender de una forma más clara, cómo funciona el sistema, en las figuras 60 y 61 se muestran los ejes en el equipo de inspección:



Figs. 60 y 61. Ejes de referencia del equipo de inspección.

La versión del SETUP SCAN se puede observar en la figura 62:



Fig. 62

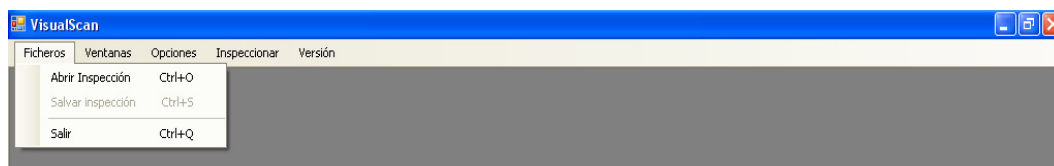
Una vez configurado el programa de barrido se puede salir y pasar al módulo de Evaluación-Adquisición (Aire), figura 63:



Fig. 63

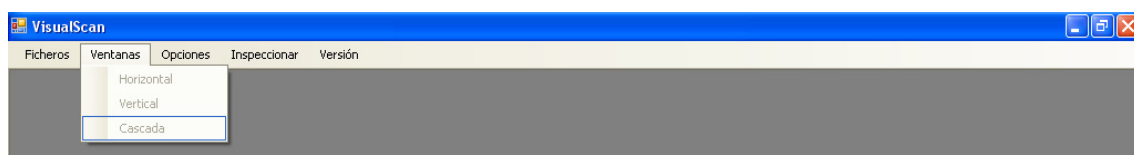
Este módulo tiene diversas opciones:

- Fichero (Fig. 64)



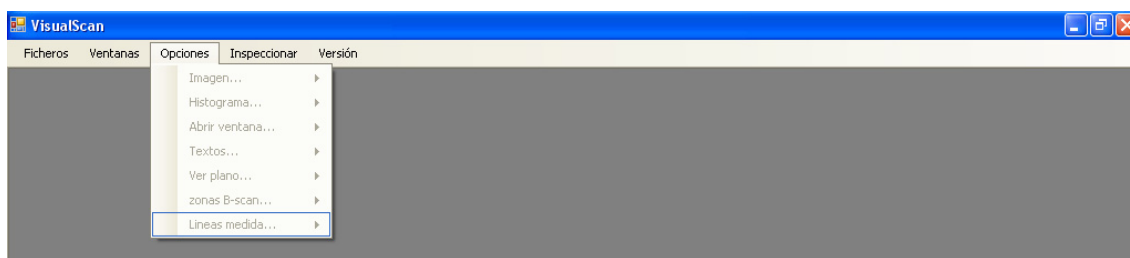
Existen varias opciones, Abrir inspección, si previamente se ha salvado una inspección o Salvar inspección, realizada una inspección, se puede guardar la configuración o las imágenes que se han obtenido en la prueba o simplemente salir del programa.

- Ventanas (Fig. 65)



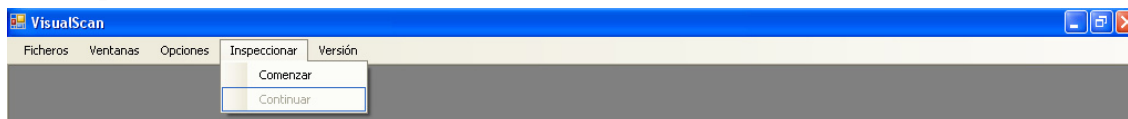
Permite determinar como se muestra la ventana de opciones.

- Opciones (Fig. 66)



En este menú se pueden configurar diversas opciones del programa (ver figura 66), el comando imagen, guarda las imágenes de una inspección, toda la pantalla o sólo la imagen de la inspección. Histograma, opción que se puede utilizar para el cálculo de área dañada, si se seleccionan determinados colores en el histograma, se puede calcular el porcentaje que representan estos colores sobre el total, opción que sin duda, resulta útil para el cálculo de áreas. También es posible insertar textos a las imágenes, ver planos, o ver la inspección en *B-scan* en vez de *C-scan*.

- Inspeccionar (Fig. 67)



Resulta ser la opción más utilizada y sirve para realizar una nueva inspección, o continuar con alguna que se haya detenido por algún problema.

Si se pulsa sobre comenzar la inspección se obtiene un cuadro de diálogo como el que se muestra en la figura 68:

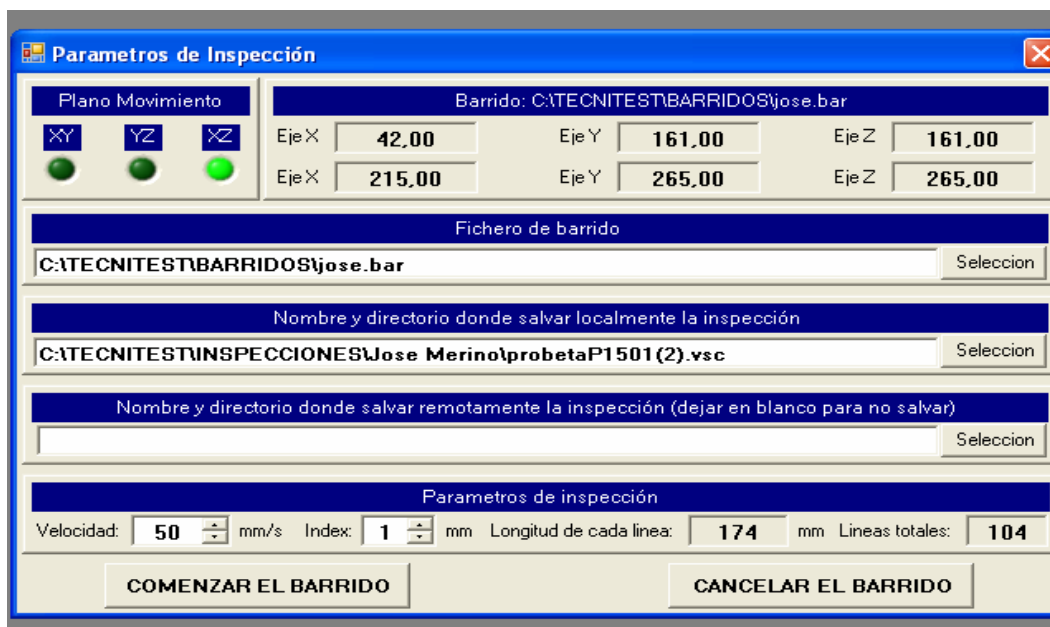


Fig. 68. Pantalla parámetros de inspección.

En este cuadro se pueden observar diferentes aspectos, en primer lugar, arriba a la izquierda se tiene: plano de movimiento se encenderá una “luz virtual” donde se puede escoger los planos de movimiento, por como está configurada el sistema de inspección

siempre se utilizará el plano XZ. Debajo se tiene la selección de fichero de barrido, se tiene que seleccionar una configuración de barrido (con extensión .bar) que se haya salvado previamente en el SETUP SCAN. Arriba a la derecha se mostrará desde donde hasta donde se realizará la inspección, valores extraídos del archivo .bar.

Luego se debe completar donde se salva la inspección, la inspección se guarda con el nombre que se desee en un archivo con extensión .vsc. Posteriormente se puede abrir y extraer imágenes de la inspección en extensiones típicas de imágenes .bmp o .jpg.

Más abajo existe una ventana, para salvar la inspección remotamente, es decir, si el equipo está conectado a una red, se podrá salvar remotamente en otro lugar, siempre con extensión .vsc. Si no se desea salvar la inspección remotamente este cuadro se deja en blanco.

Por último se tienen, los parámetros de inspección, la *velocidad de inspección* es un parámetro importantísimo pues determinará el tiempo total de la inspección a mayor velocidad menor tiempo de inspección, pero la resolución puede ser peor, por lo que la solución óptima pasará por adoptar un compromiso, más adelante se hablará de este tema. El *index*, determina de cuánto en cuánto se producen los incrementos en el eje Z de la inspección, de nuevo a mayores *index* inspecciones más rápidas pero menos precisas, dependerá también del tamaño de la pieza. Además el propio software calcula las dimensiones de cada línea, y el número de líneas de totales. Por lo que, el “inspector experimentado” se podrá hacer una idea de lo que puede durar su inspección total. Sólo resta comenzar el barrido. Adicionalmente se puede cancelar la inspección por cualquier motivo.

En la figura 69, se puede observar la versión adquirida.



En el capítulo 5 (*Resultados*), se exponen los resultados obtenidos, cuando se varían los parámetros anteriores. Además se comparan los resultados de diferentes velocidades de barrido, y las imágenes que se obtienen al cambiar los transductores y utilizar otras frecuencias.

4.5 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Puesto que las probetas han sido previamente impactadas, al realizar una inspección, se va a obtener sombras o configuraciones de colores en la zona dañada (en inglés, *damage area*). El principal problema radica en cuantificar el área de esta zona. Para ello, el autor propone dos métodos, que se exponen a continuación

1) Análisis del histograma, mediante el software *Visual Scan*.

Una vez que se ha conseguido una imagen adecuada, en la pestaña opciones, se selecciona histograma (figura 66) y posteriormente se escoge *selección de zona*. Primeramente, mediante un rectángulo se selecciona el área total de la probeta, tal y como se muestra en la figura 72:

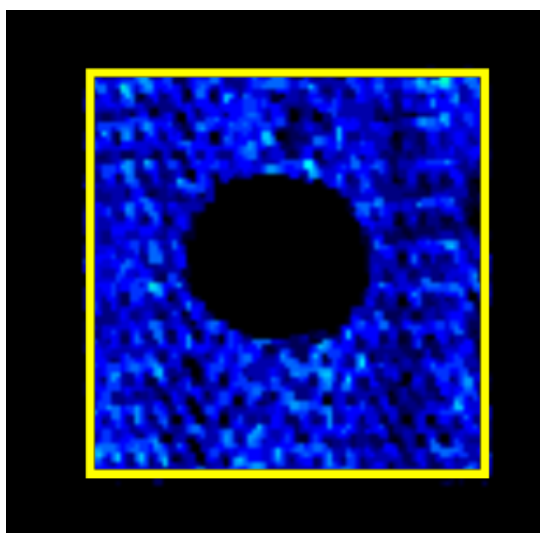


Fig. 72. Selección de zona para el cálculo de área dañada mediante histograma.

Paso seguido, el software del equipo muestra un histograma como el de la figura 73. En éste cuadro se muestran los colores utilizados para la representación, en particular para la imagen obtenida, claramente, el área dañada coincide con el “hueco negro” que se observa en la zona central de la imagen, por tanto, se selecciona las barras negras del histograma y para este caso, el programa determina el área dañada: “El área seleccionada es de 1242 mm² y representa el 17,39 % del total”.

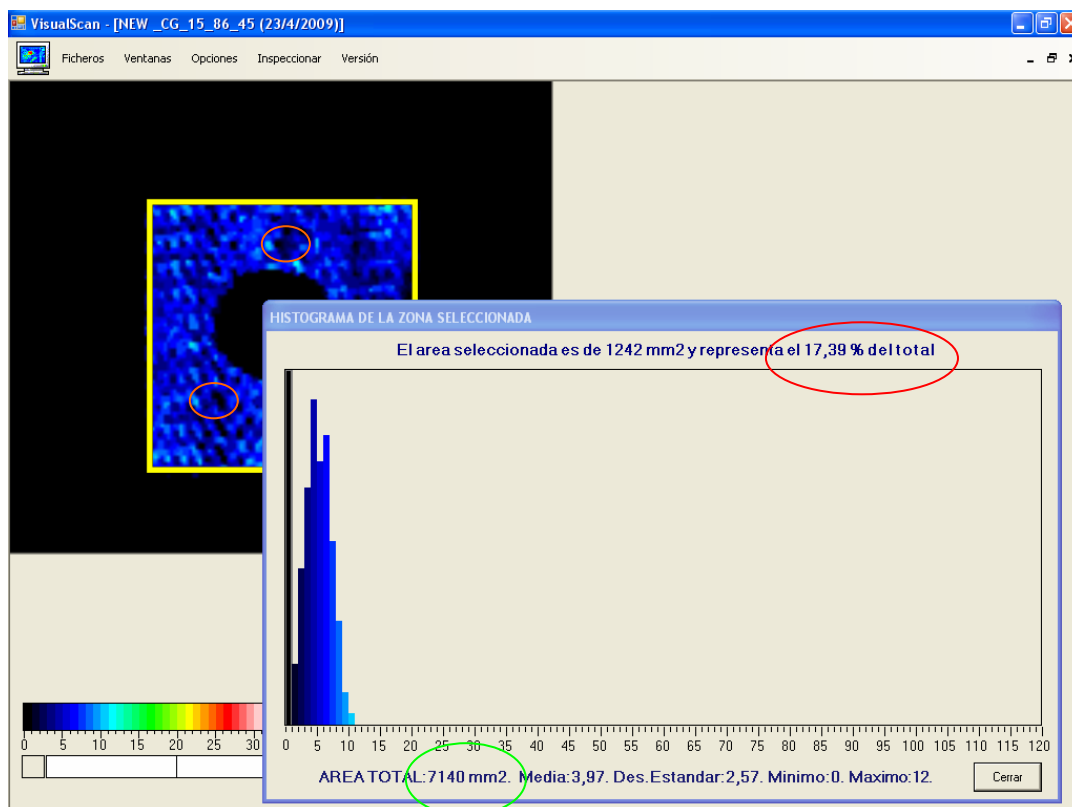


Fig. 73. Histograma de la zona seleccionada.

Este método para el cálculo de áreas, obtiene una aproximación de cálculo del área dañada pero presenta algunos inconvenientes. A continuación, se exponen algunos de los problemas de este software.

El equipo parte de un error, el área total de la probeta a inspeccionar es de 140 mm x 140 mm, es decir, 19600 mm². El software determina, un área total de 7140 mm², como se observa en la figura 73, que resulta contradictoria con el área total real, por tanto se trata de un error del software. No obstante, aunque el área total esté mal resuelta, el área dañada que se puede calcular si es correcta. Aunque hay que tener en cuenta algunas consideraciones, si se observa la imagen de la figura 72 en detalle, no sólo en el “circulo central” hay zona negra, también existen pequeñas áreas dispersas en la imagen obtenida para la probeta (ver círculos naranjas de la figura 73), que también han sido representadas en negro, por lo que en este caso, se está realizando una mayoración del área dañada, que no se puede controlar.

Adicionalmente se expone que en el transcurso de los ensayos, el software, no siempre corre con facilidad, dando errores de forma constante para esta aplicación.

En resumen, éste aplicación con los problemas expuestos anteriormente, sirve para tener una idea del área dañada. Se trata de un método rápido para una primera aproximación del área dañada, aunque no demasiado exacto, como se demostrará posteriormente. Con objeto de verificar los resultados de áreas arrojados por este método y determinar otros resultados más exactos, se propone otro método alternativo al anterior.

2) Análisis del programa mediante software *ImageJ*.

Para la evaluación del área dañada, fue empleado el programa *ImageJ*. Este software libre es una herramienta de análisis y procesamiento de imágenes de gran rapidez y arquitectura basada en “*plug-ins*”. Ofrece un panel de funciones muy sofisticado que va desde la colorimetría, análisis de contornos, filtros de imágenes, cálculos de áreas, ángulos y distancias entre píxeles, histogramas de densidad y soporta operaciones estándares de procesamiento de imágenes como por ejemplo, la manipulación del contraste, la detección de contornos, el filtrado de medianas, el aumento de la nitidez, el efecto del suavizado, etc. *ImageJ*, puede trabajar con un número ilimitado de imágenes simultáneamente y es compatible con imágenes de 8, 16 o 32 bits y puede operar con los formatos TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS y RAW. A partir de un menú principal, se aplica el programa para calcular, en este caso, el porcentaje de área dañada con relación a la superficie total de la probeta.

A continuación, se propone un ejemplo de cálculo de área. Se abre el programa *ImageJ* (figura 74) y se abre una imagen salvada (*File - Open*).

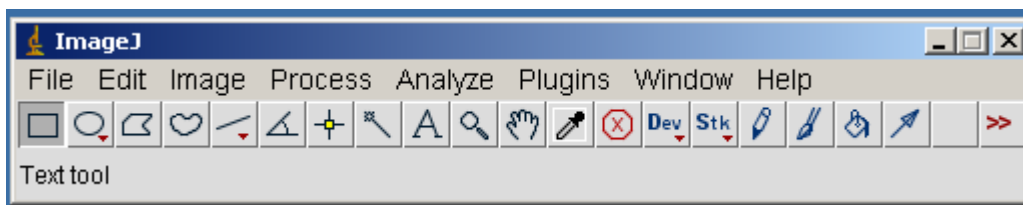


Fig. 74. Ventana principal *ImageJ*.

Posteriormente, en *Analyze, Set Scale*, se configura la escala, para ello se selecciona una línea de la imagen de longitud conocida, como por ejemplo, el lado de la probeta que mide 140 mm, y con este valor se configura la escala con esta longitud conocida (figura 75):

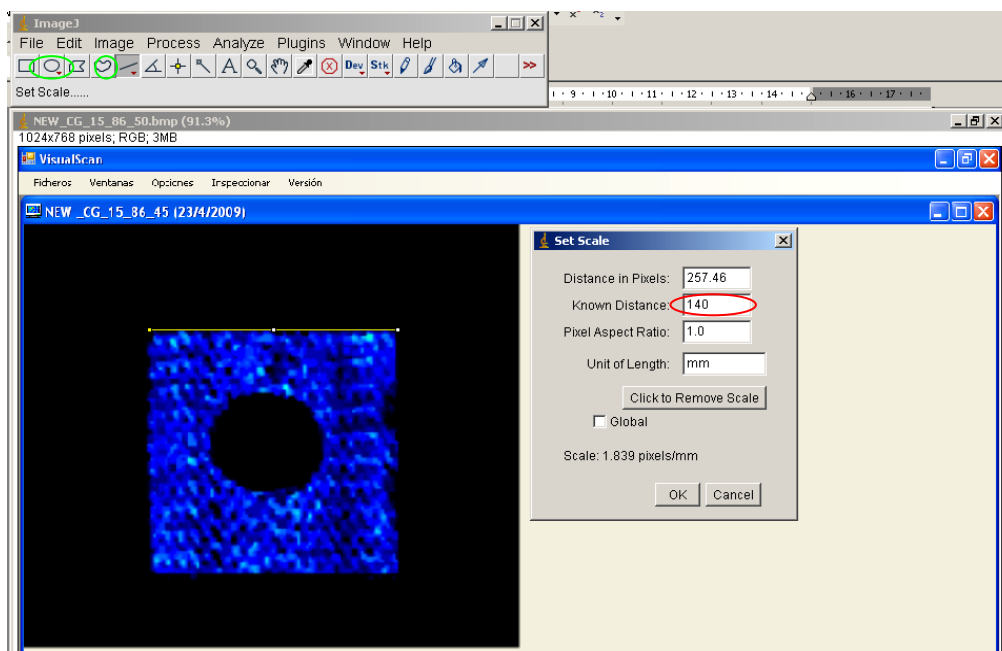


Fig. 75. Configuración de escala en *ImageJ*.

Con la determinación de la escala propuesta anteriormente, se puede establecer comparaciones entre imágenes que gráficamente o visualmente tengan escalas distintas.

Ahora, se selecciona la herramienta o círculo o línea general (círculos verdes de la figura 75). Posteriormente en *Analyze, Measure*, se obtiene el área en mm², como se muestra en la figura 76.

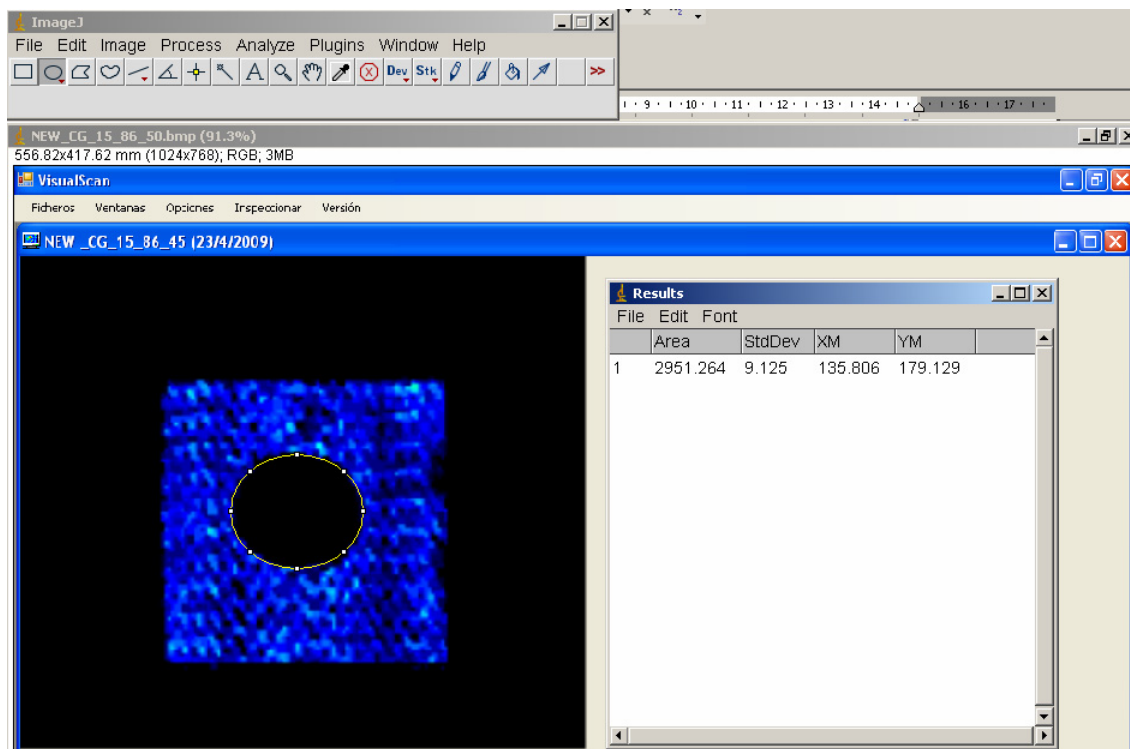


Fig. 76. Cálculo del área dañada mediante *ImageJ*.

Se puede obtener así, el área en términos de porcentaje, si el área total de la probeta es de 19600 mm² y el área dañada calculada ha sido de 2951, 2 mm². Significa que:

$$\frac{2951,2}{19600} \times 100 = 15,06\%$$

El área dañada resulta ser el 15,1 %.

En resumen, con ambos métodos se obtienen porcentajes de áreas muy similares, con el método 1 (*cálculo de áreas mediante histogramas*) se determina un área dañada del 17,4% frente al 15,1% obtenido con el método 2 (*cálculo de áreas mediante ImageJ*). Aunque se consideran más exactos los resultados obtenidos con el software *ImageJ*, ya que esté no tiene en cuenta otros “huecos negros” fuera del área central dañada.

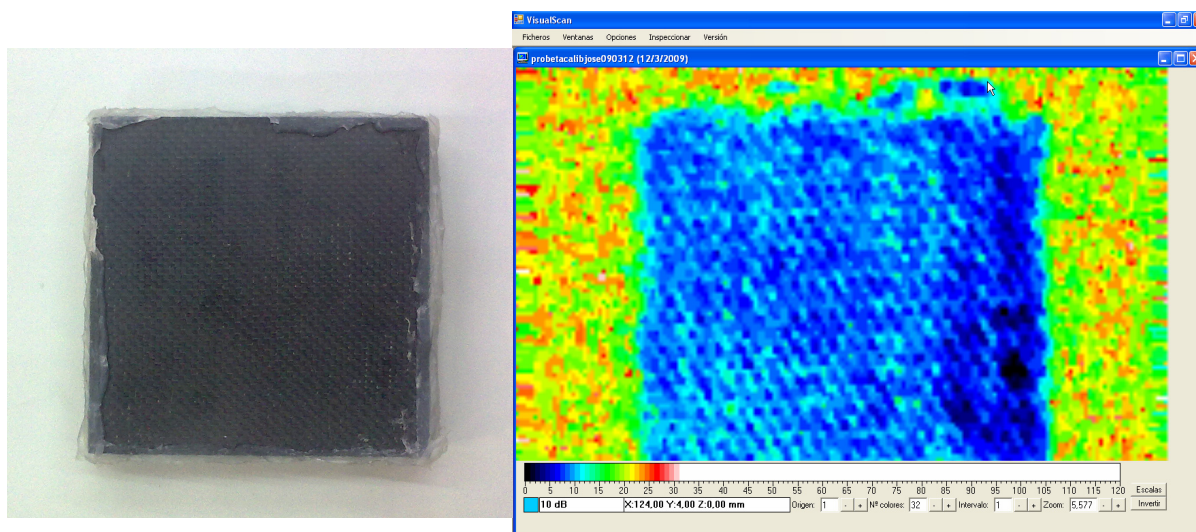
En el capítulo 6, *análisis de resultados*, se establecen otras comparaciones.

5 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados e imágenes obtenidas con el equipo. En la mayor parte de los casos se utilizan transductores de 225 kHz, y las principales conclusiones del proyecto harán referencia a esta frecuencia. Adicionalmente, se han considerado otras frecuencias, en concreto, se han llevado a cabo inspecciones con frecuencias de 50 kHz y 400 kHz.

5.1 VARIACIÓN DE LOS AJUSTES EN LA PRESENTACIÓN

En esta primera parte, se utiliza una probeta sin impactar, la cual se considera como de referencia o de calibración (figuras 77 y 78).



Figs. 77 y 78. Fotografía de la probeta de referencia y C-Scan de la misma.

El objetivo de esta primera parte, es además de considerar las diferentes opciones de visualización que tiene el programa, una vez se determinen configuraciones de imágenes de calidad suficientes, inspeccionar probetas dañadas para proceder a analizar los resultados.

A continuación se expone otra probeta P-15-01 (figura 79), utilizando diferentes opciones de visualización, se observan imágenes de alta resolución y gran calidad (figuras 80, 83 y 84). Incluso en las configuraciones de blancos y negros se puede observar cierta similitud con técnicas de inspección radiográficas (figuras 81 y 82).



Fig. 79. Fotografía probeta P-15-01.

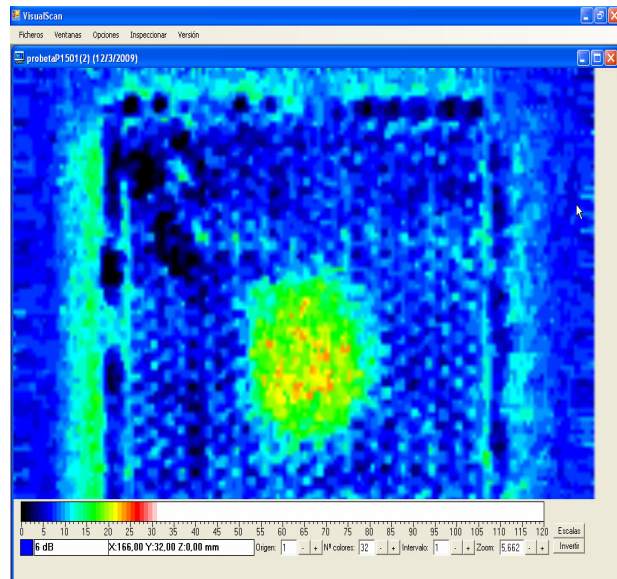


Fig. 80. C-Scan probeta P-15-01. Configuración RGB.
(Red, Green y Blue)

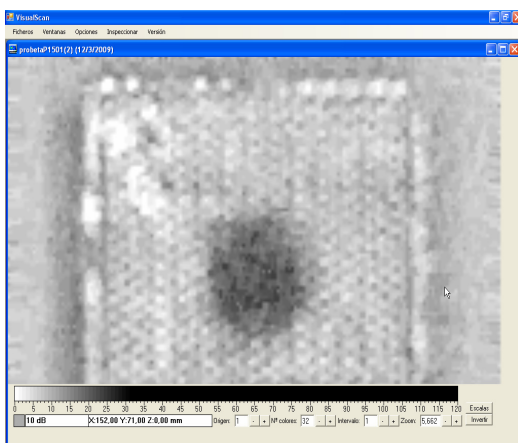


Fig. 81. C-Scan probeta P-15-01.
Configuración Blanco y Negro.

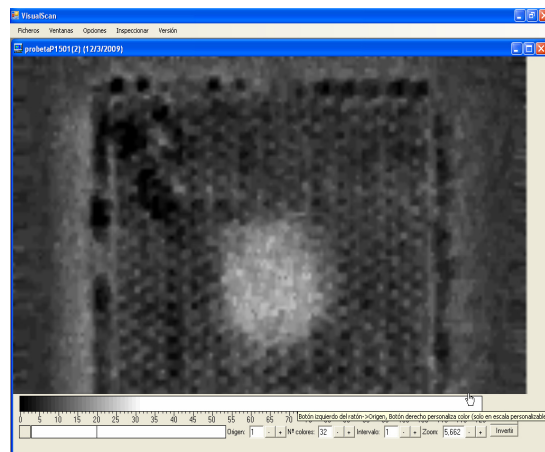


Fig. 81. C-Scan probeta P-15-01.
Configuración Negro y Blanco.

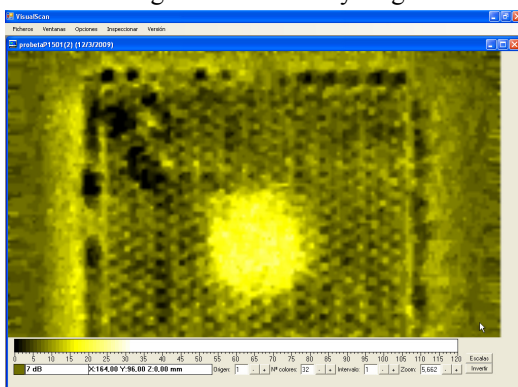


Fig. 82. C-Scan probeta P-15-01.
Configuración Amarillo y Negro.

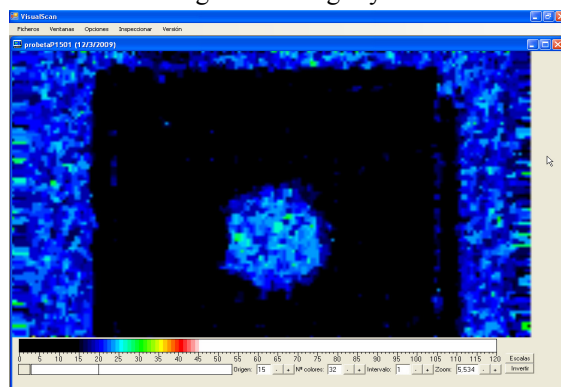


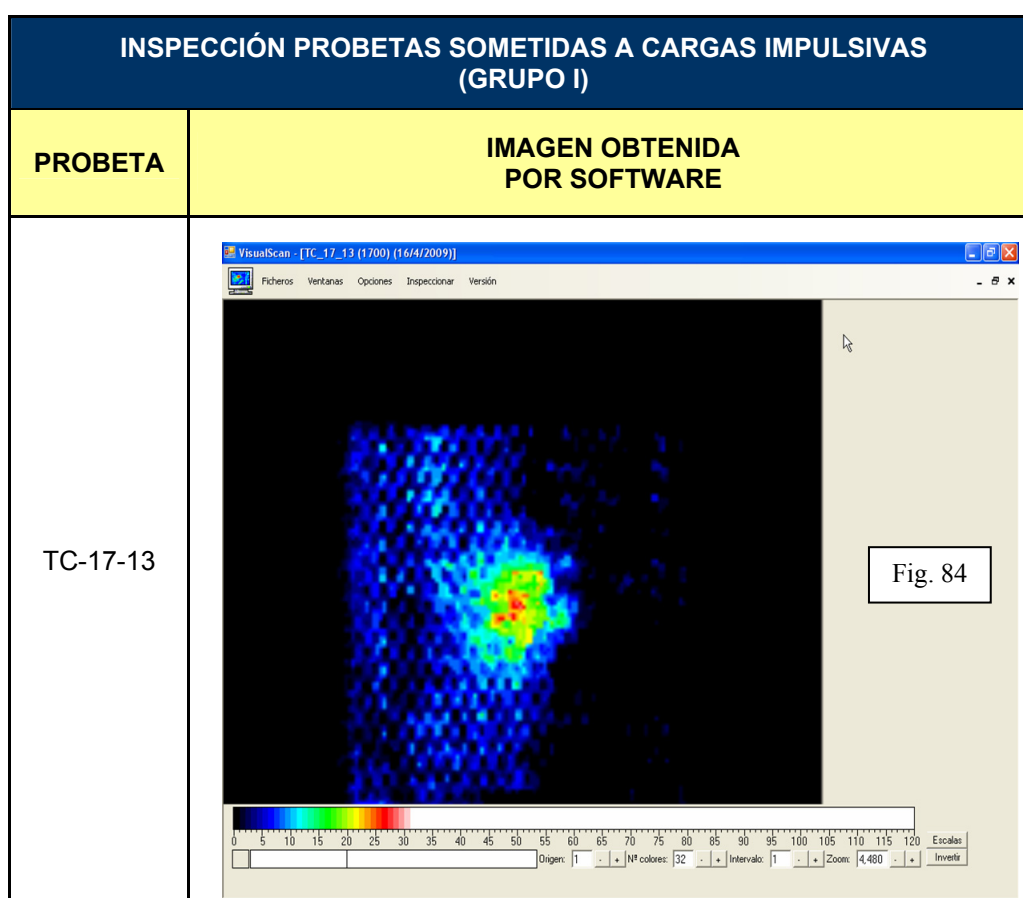
Fig. 83. C-Scan probeta P-15-01.
Configuración RGB modificada.

5.2 RESULTADOS DE PROBETAS IMPACTADAS

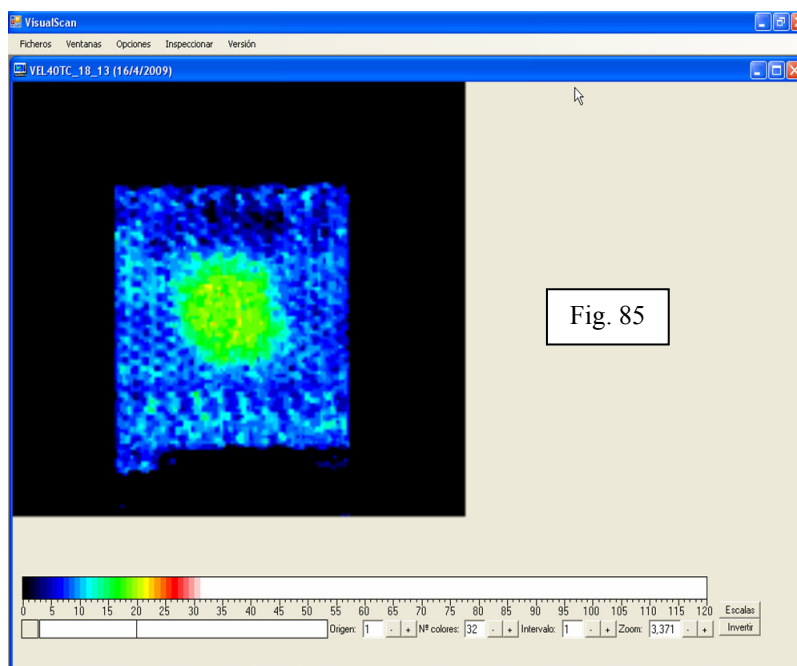
Si bien, en este capítulo se exponen los resultados obtenidos, el área dañada se calculará en el capítulo siguiente (*Análisis de resultados*).

En esta primera parte se analizan probetas sometidas a cargas impulsivas de baja velocidad, las figuras de la 84 a la 96, representan los resultados obtenidos.

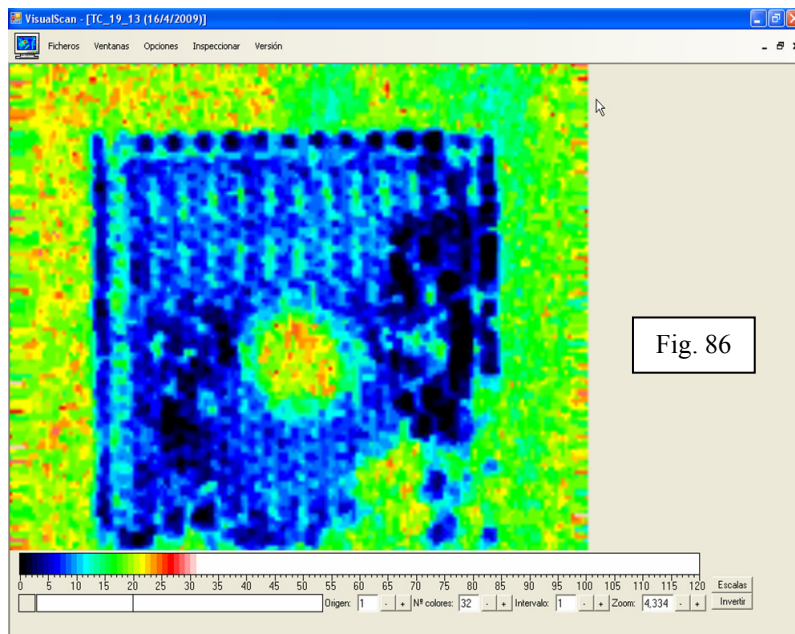
Las probetas tienen una designación especial, se han diferenciado en dos grupos dependiendo de cómo se produzco el daño, aunque esto debe ser irrelevante para el desarrollo del proyecto, sólo se procederá a determinar el área dañada experimentalmente. El código de la probeta es el que se encontraba en la muestra, adicionalmente, si se han realizado varios ensayos sobre la misma probeta, estos aparecen con un número entre paréntesis.



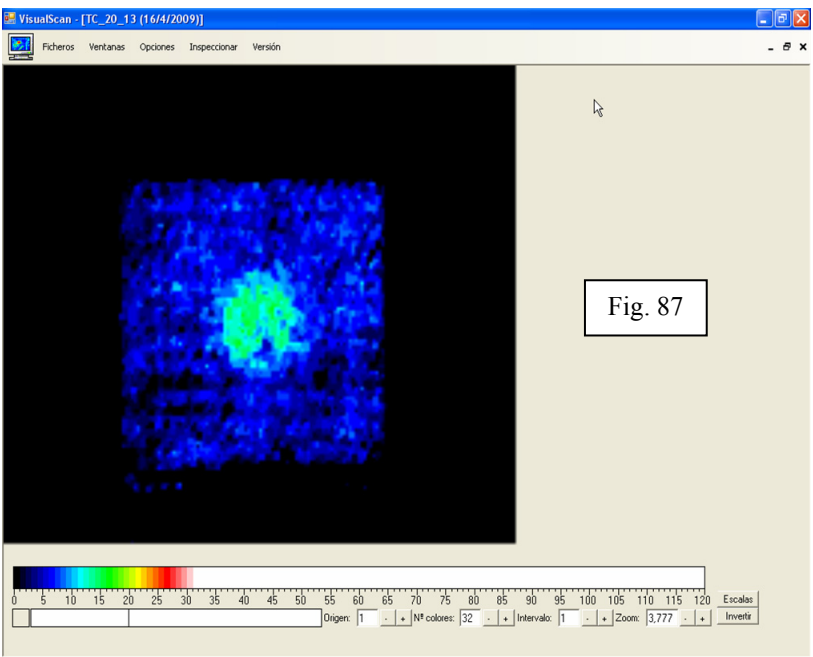
TC-18-13



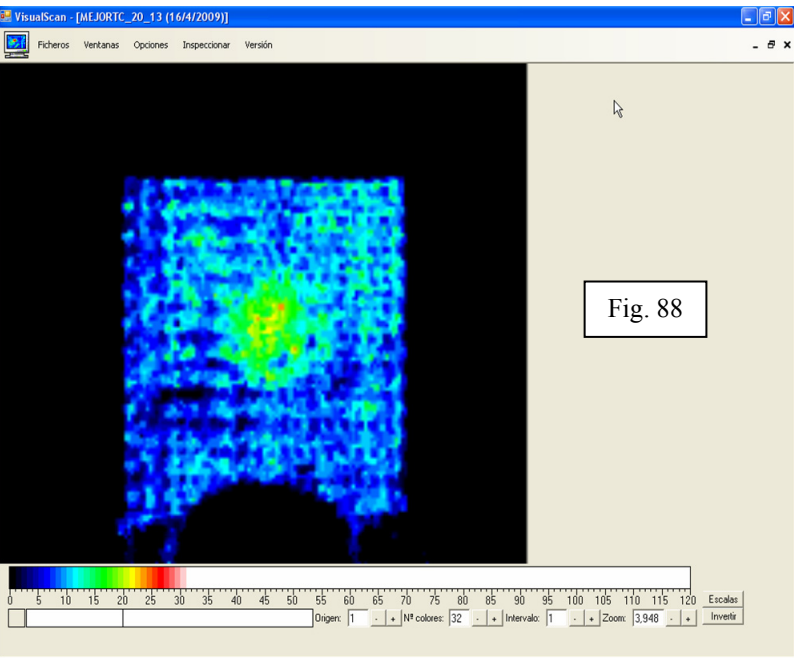
TC-19-13

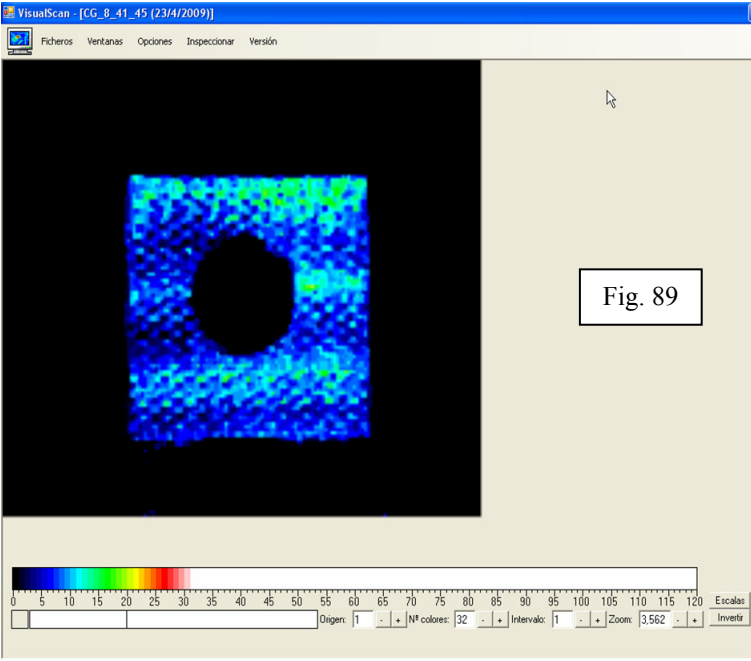
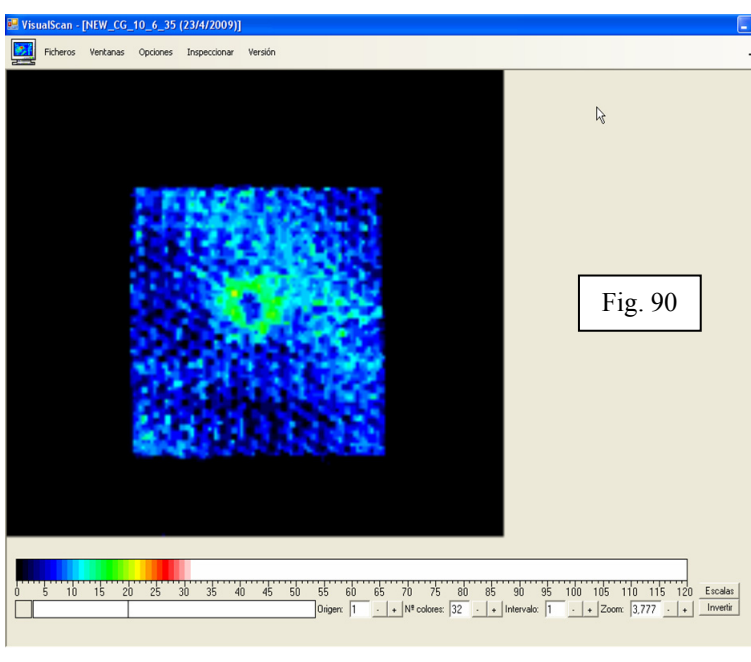


TC-20-13

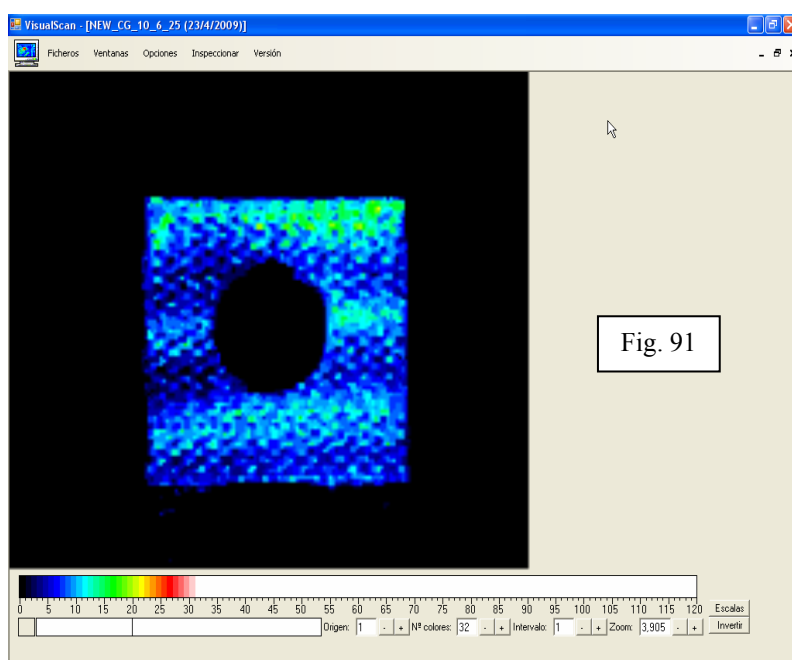


TC-20-13 (2)

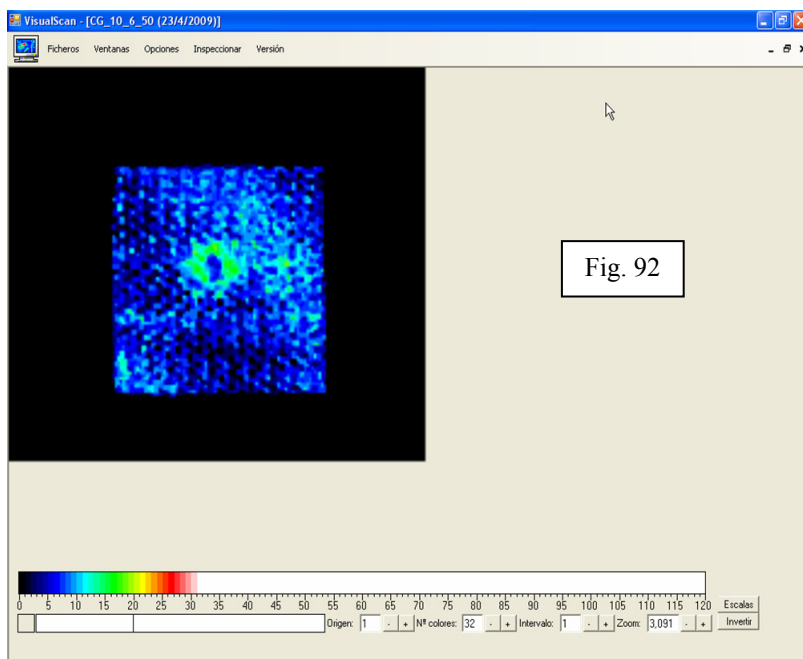


PROBETA	IMAGEN OBTENIDA POR SOFTWARE
CG-8-41	 <p>Fig. 89</p>
CG-10-6	 <p>Fig. 90</p>

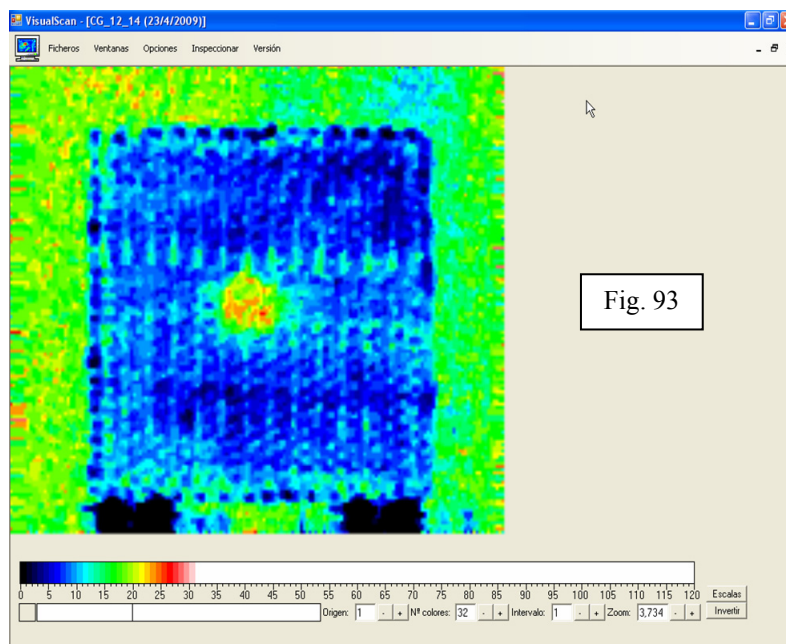
CG-10-6 (2)



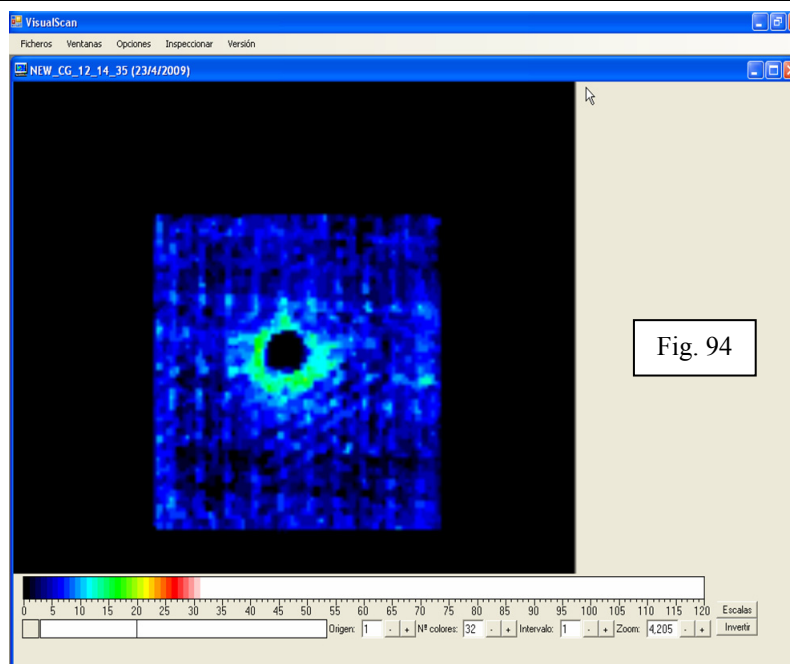
CG-10-6 (3)

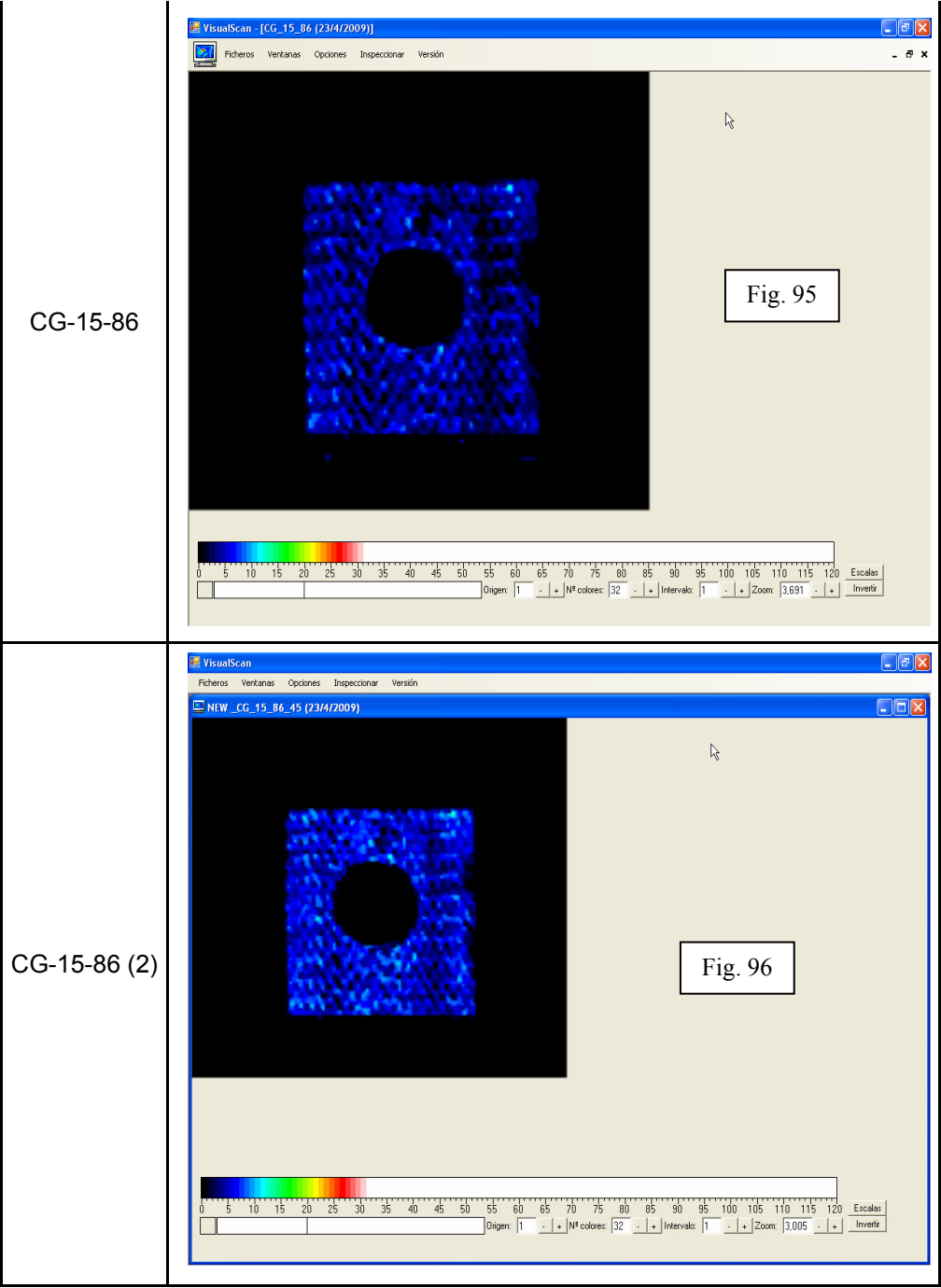


CG-12-14



CG-12-14 (2)

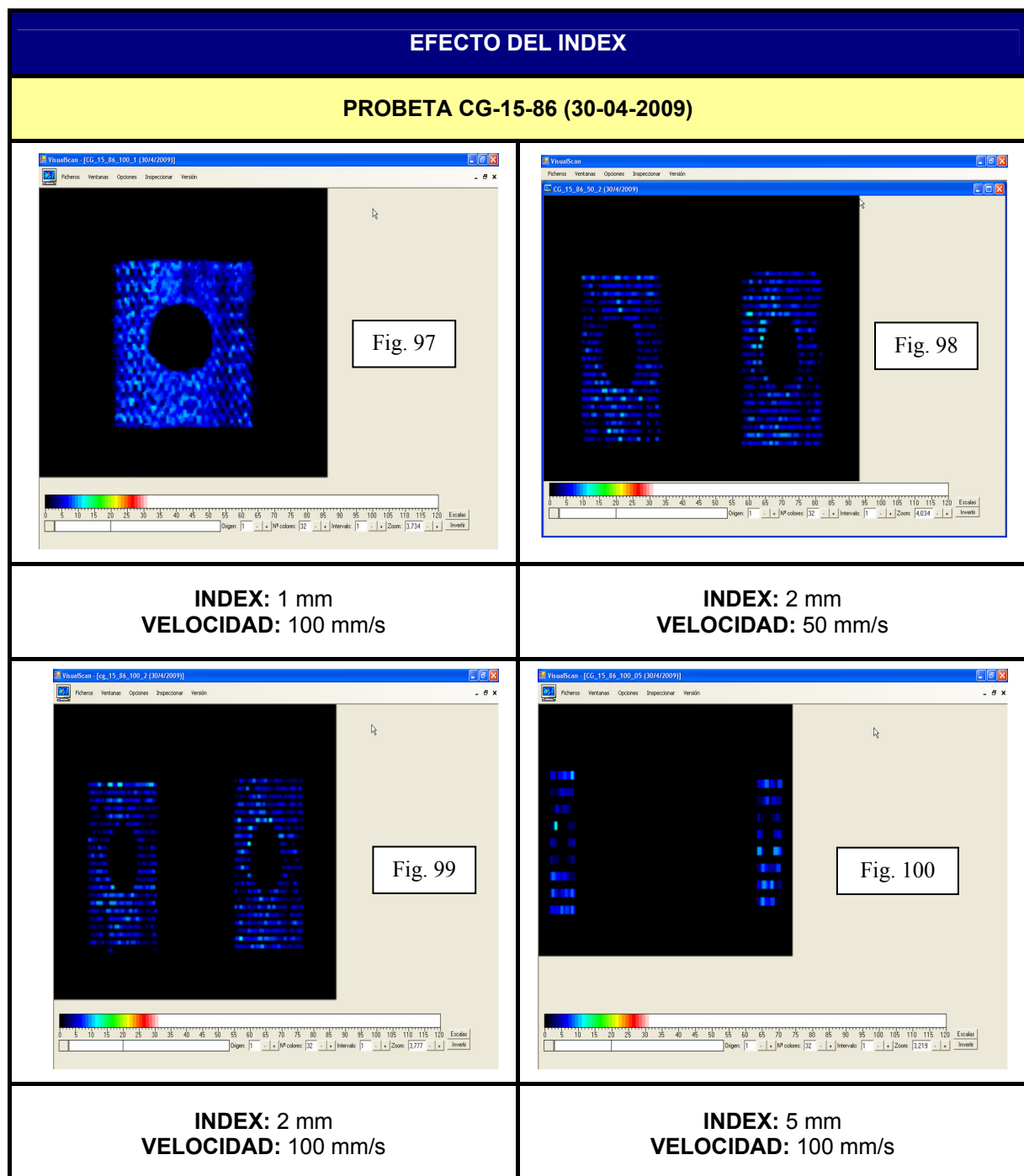




5.3 EFECTO DEL INDEX

El *index*, representa el incremento de posición en el eje Z (ver figura 60), cada vez que se termina una línea de barrido.

Para el material considerado y para los transductores de 225 kHz, variar el *index* no obtiene mejores resultados. En realidad, al aumentar éste, se obtienen lógicamente menores tiempos de inspección pero las imágenes que se obtienen son de peor calidad. Se considera un *index* óptimo, igual a 1 mm (figura 97). Adicionalmente, se puede observar, que el efecto de aumentar la velocidad de barrido no obtiene peores resultados, como se puede deducir de comparar la figura 98 y 99.



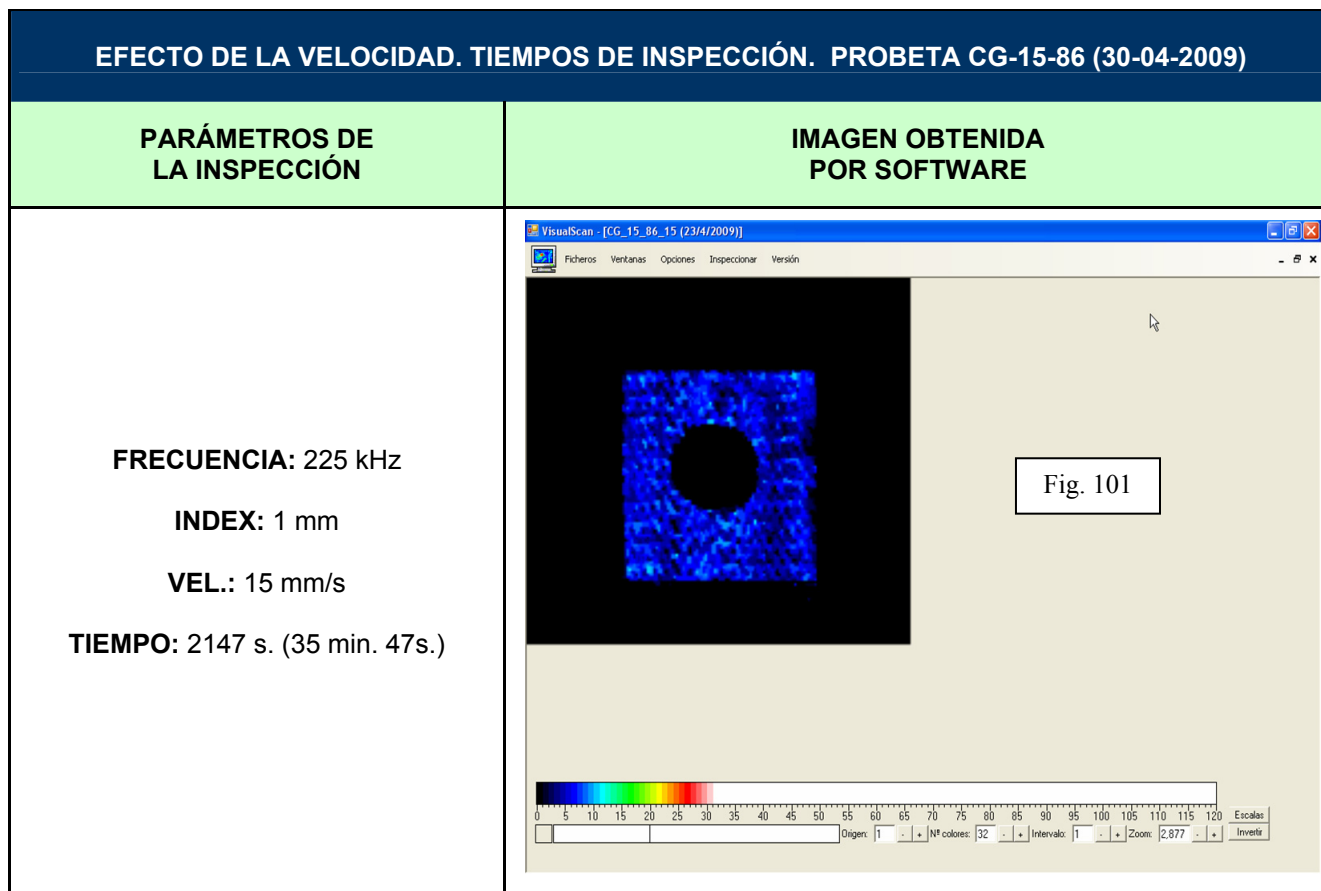
5.4 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE INSPECCIÓN

La velocidad de inspección o velocidad de barrido, es un parámetro fundamental de la inspección por ultrasonidos, ya que determina los menores tiempos de inspección y por tanto, permite inspeccionar mayor número de muestras por unidad de tiempo, o mayor área por unidad de tiempo.

En las pruebas realizadas con el equipo, para el material considerado y para transductores de frecuencia 225 kHz, experimentalmente se ha determinado la máxima velocidad de inspección que produce resultados de calidad (velocidad óptima de inspección) siendo ésta, para el material de estudio, de 163 mm/s.

Para determinar esta velocidad, se ha procedido de la siguiente manera, para una muestra en la que se obtienen buenas imágenes se va aumentando progresivamente la velocidad hasta que se deja de obtener imágenes de calidad, en este caso, no se produce imagen para velocidades altas. Ver conjunto de figuras de la 101 a la 107. En la figura 105 se produce el óptimo, y en las figuras 106 y 107, no se obtienen imágenes.

En el apartado 5.9, se determinará que, la velocidad óptima de inspección, es dependiente del transductor empleado, no manteniéndose esta velocidad para otras frecuencias.

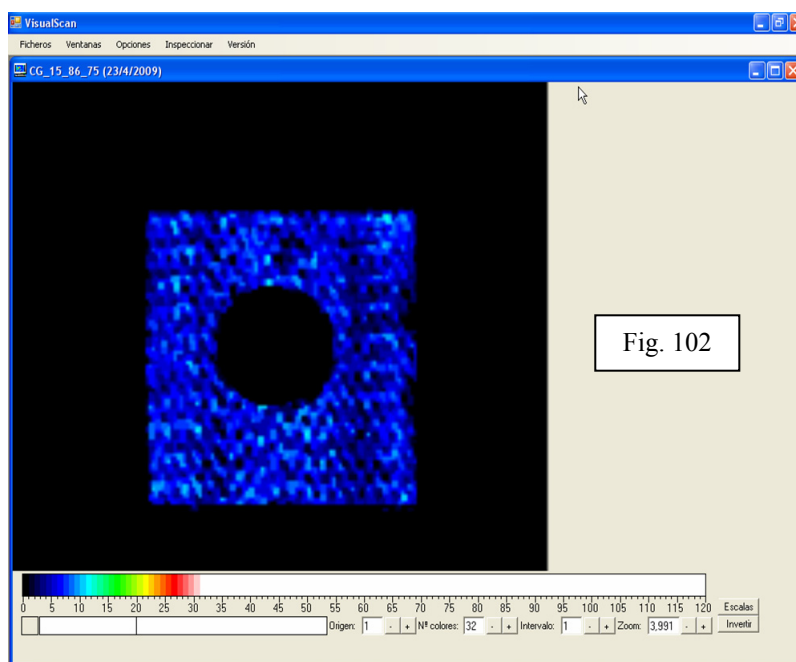


FRECUENCIA: 225 kHz

INDEX: 1 mm

VEL.: 75 mm/s

TIEMPO: 429 s. (7 min. 9 s.)

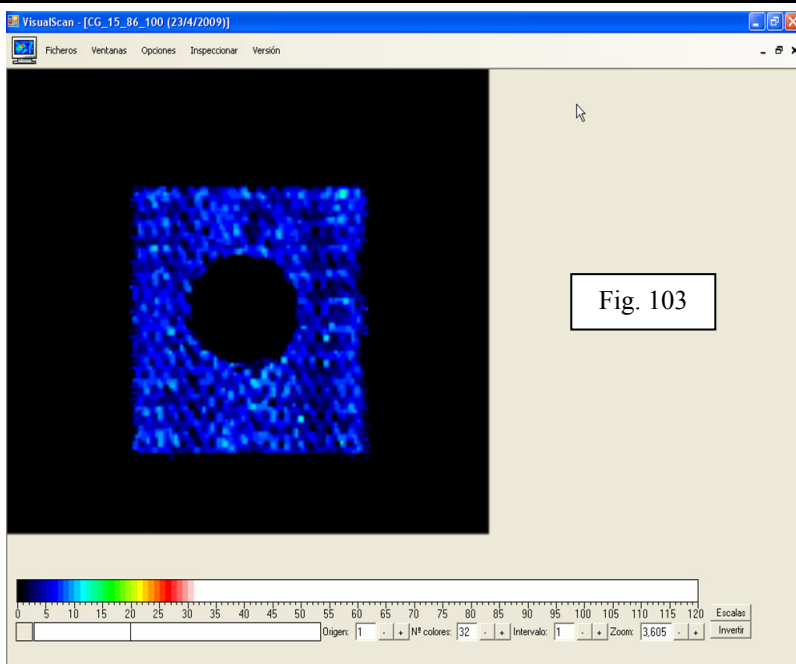


FRECUENCIA: 225 kHz

INDEX: 1 mm

VEL.: 100 mm/s

TIEMPO: 322 s. (5 min. 22 s.)

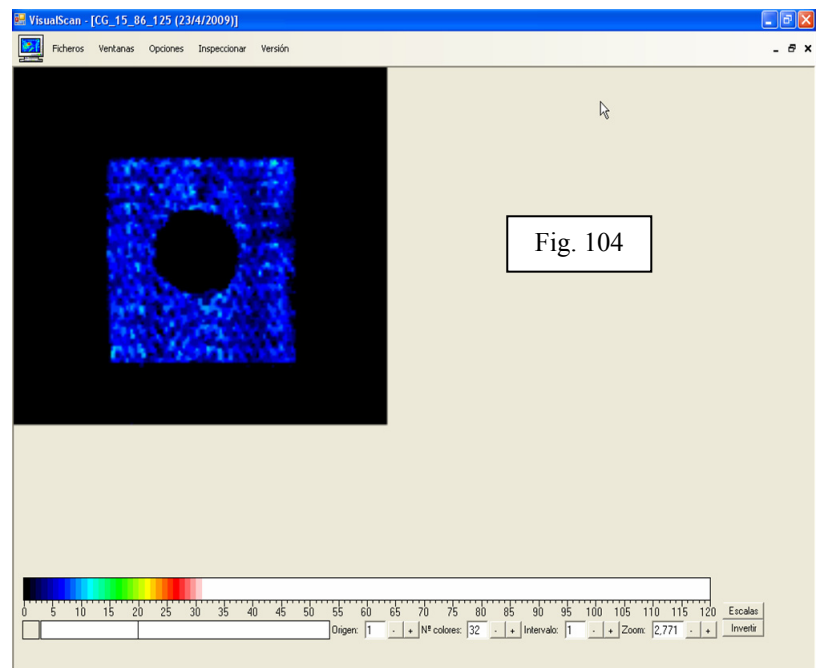


FRECUENCIA: 225 kHz

INDEX: 1 mm

VEL.: 125 mm/s

TIEMPO: 258 s. (4 min. 18 s.)



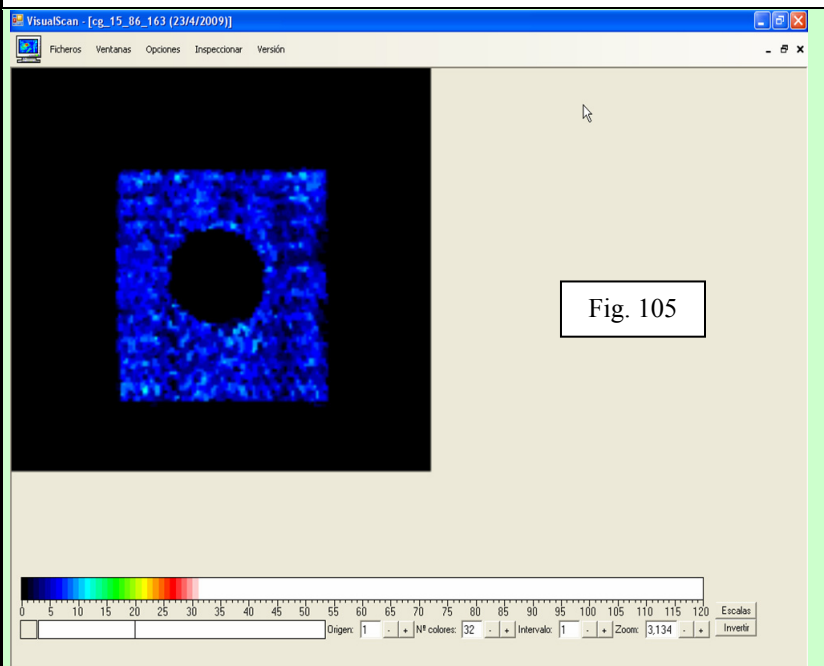
FRECUENCIA: 225 kHz

INDEX: 1 mm

VEL.: 163 mm/s

TIEMPO: 198 s. (3 min. 18s.)

ÓPTIMO

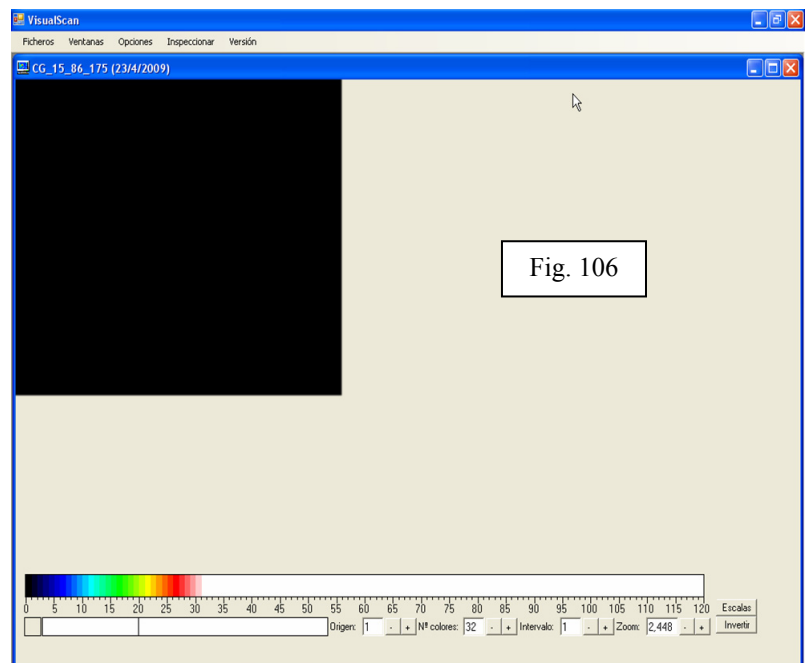


FRECUENCIA: 225 kHz

INDEX: 1 mm

VEL.: 175 mm/s

TIEMPO: 184 s. (3 min. 4 s.)

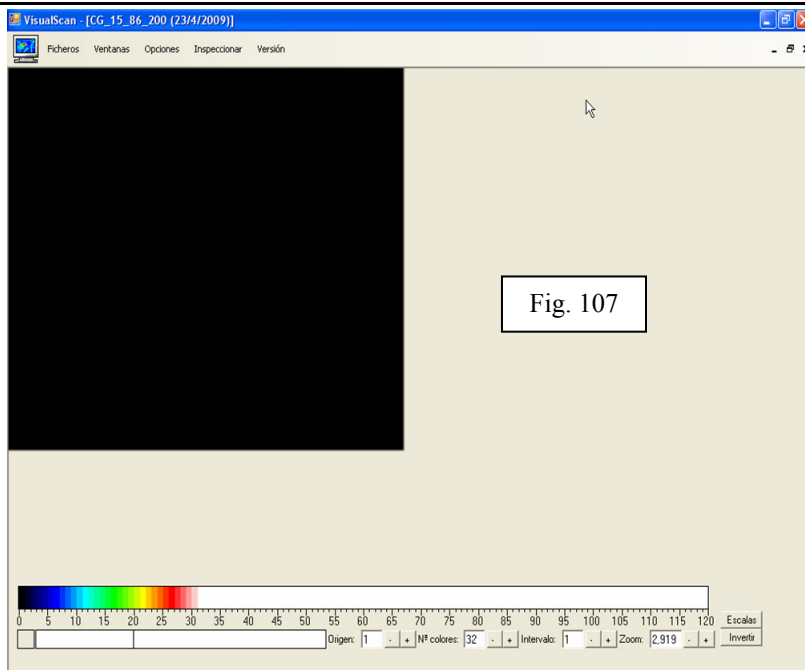


FRECUENCIA: 225 kHz

INDEX: 1 mm

VEL.: 200 mm/s

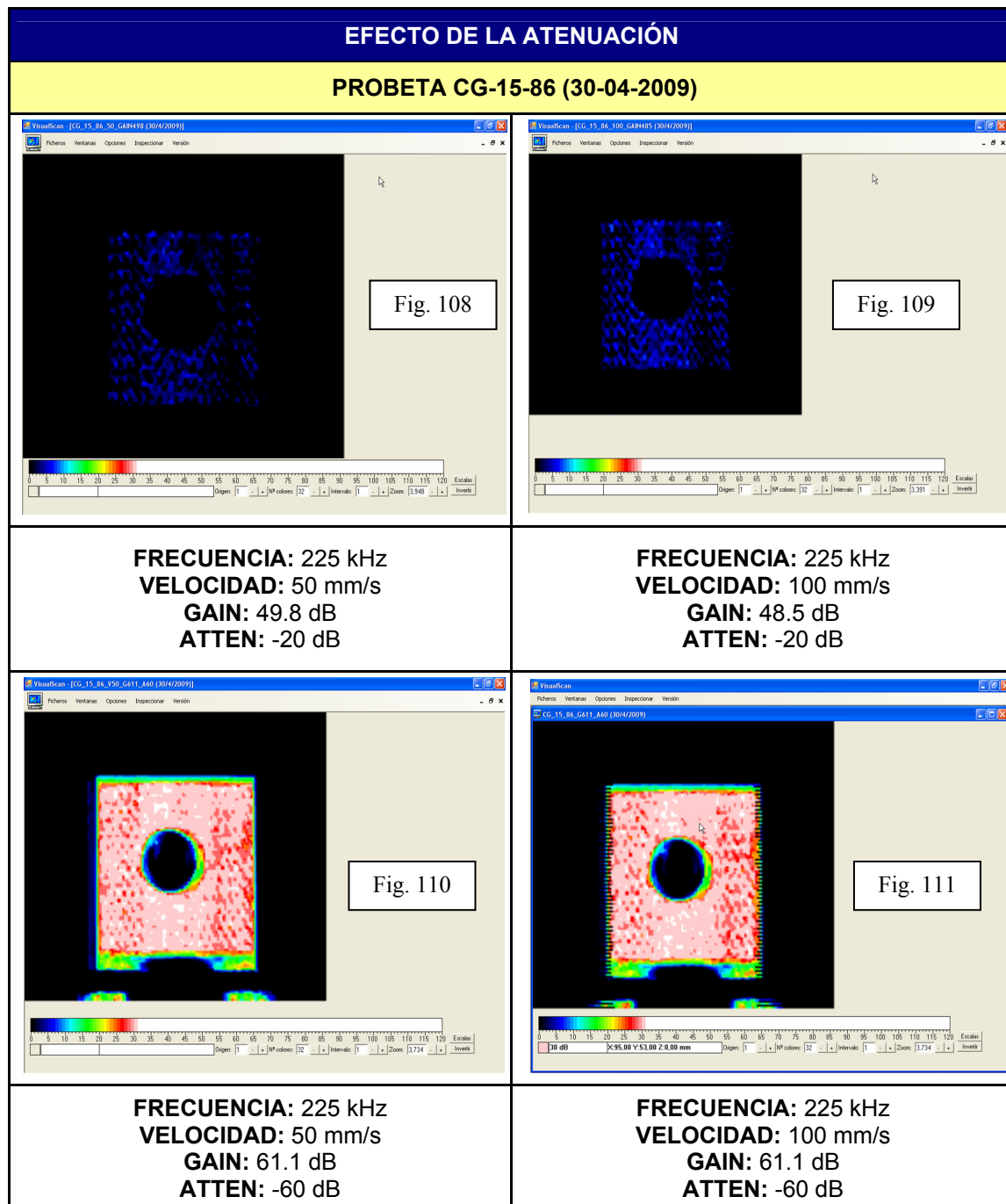
TIEMPO: 161 s. (2 min. 41 s.)



Con la velocidad óptima, y para los transductores de 225 kHz se puede calcular el tiempo de inspección para un metro cuadrado de material sándwich considerado, siendo éste de 2 horas y media. Un tiempo de inspección alto, en comparación con técnicas de termografía o inspección por láser, pero a cambio la técnica empleada tiene gran resolución en las imágenes y gran sensibilidad a la presencia de defectos. Además con experiencia, se podría reducirse este tiempo a algo menos de dos horas, ajustando bien los límites de la inspección o acotando la zona dónde se tengan indicios que podría estar el defecto.

5.5 EFECTO DE LA VELOCIDAD PARA DISTINTAS GANANCIAS

A ganancia constante, para el material considerado e inspeccionando a 225 kHz, se ha determinado que el efecto de la velocidad es insignificante hasta llegar a la velocidad máxima de inspección. Este fenómeno también se manifiesta cuando se modifica la ganancia y/o la atenuación. En el paso de la figura 108 a la 109, a ganancias medias, la velocidad de inspección se duplica y no se observa variación significativa en la imagen. En el paso de la figura 110 a la 111, se observa que al duplicar la velocidad, en el ámbito de ganancias altas no se obtiene variación apreciable en las imágenes que se obtienen.



5.6 MODIFICACIÓN DEL WIDTH

El *width* representa la anchura de la puerta en la que se capturan los disparos. Gráficamente, en la figura 112 se observa este concepto:

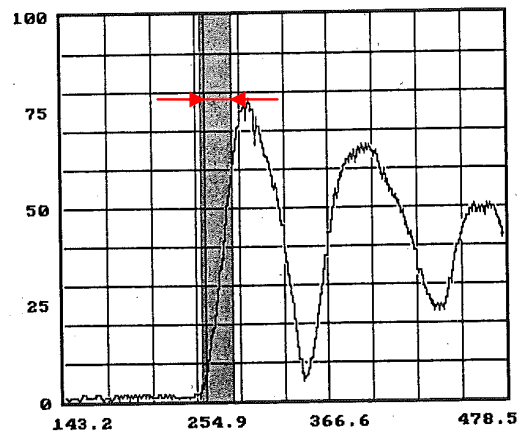
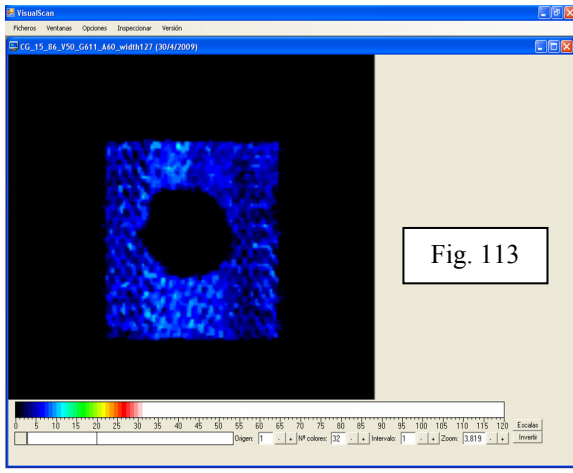
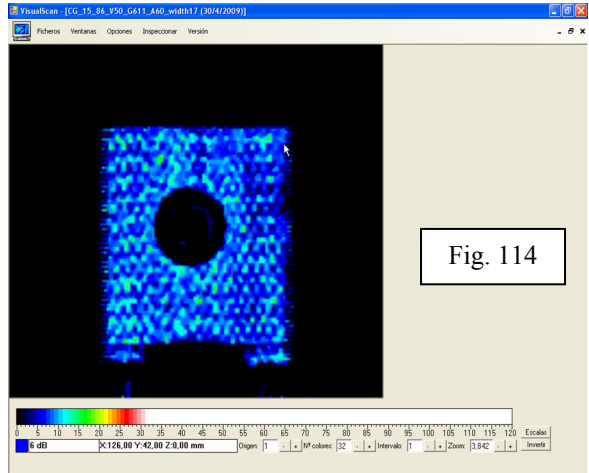


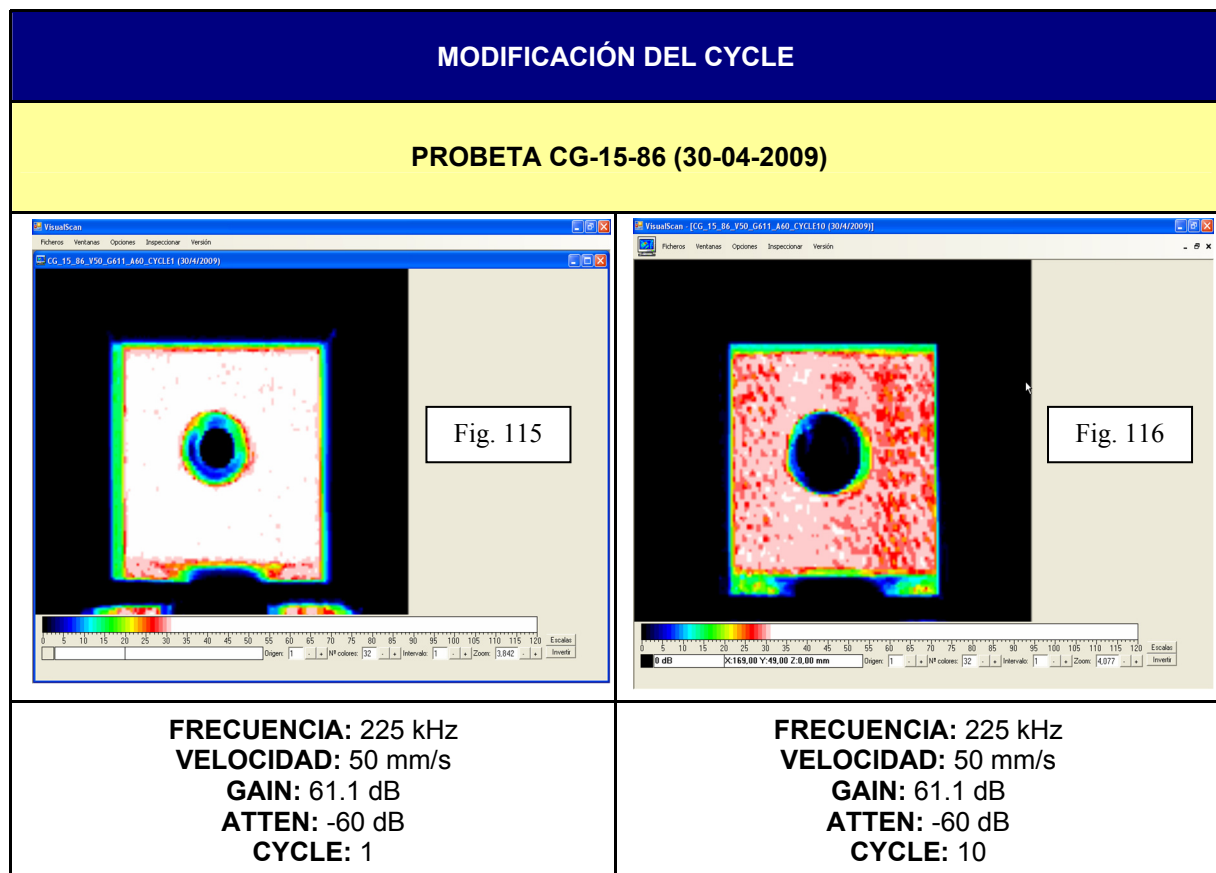
Fig. 112. Representación gráfica del *width*. Imagen tomada de [3].

MODIFICACIÓN DEL WIDTH	
PROBETA CG-15-86 (30-04-2009)	
 <p>Fig. 113</p>	 <p>Fig. 114</p>
<p>FRECUENCIA: 225 kHz VELOCIDAD: 50 mm/s GAIN: 61.1 dB ATTEN: -60 dB WIDTH: 127 µs</p>	<p>FRECUENCIA: 225 kHz VELOCIDAD: 50 mm/s GAIN: 61.1 dB ATTEN: -60 dB WIDTH: 17 µs</p>

Los efectos producidos al variar el *width*, de forma general, se consiguen mejores resoluciones al disminuir la anchura de éste, y conducen a determinar menores áreas dañadas como se observa, comparando las imágenes de las figuras 113 y 114.

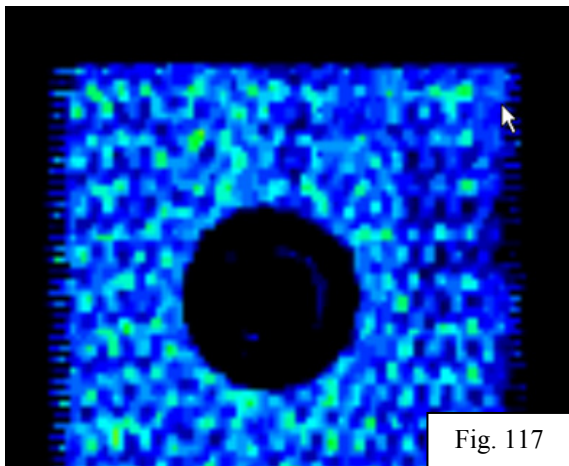
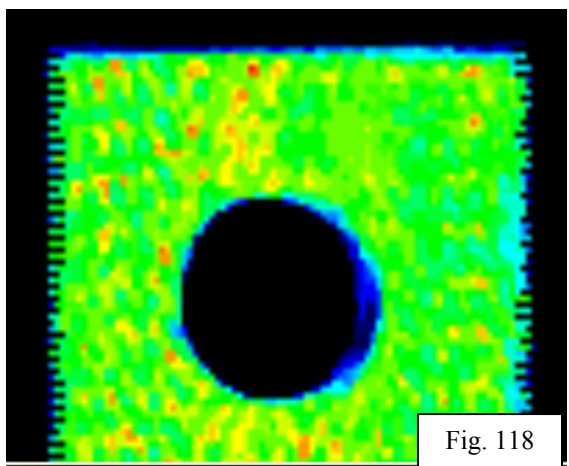
5.7 MODIFICACIÓN DEL CYCLE

El *cycle* representa el número de pulsos sin una nueva explosión de señal, el mínimo es 1, y el máximo depende de la frecuencia del transductor, para el caso del transductor de 225 kHz, el máximo permitido es 10. En las figuras 115 y 116 se observan las diferencias entre *cycle* 1 (figura 115) y *cycle* 10 (figura 116). El área dañada que se obtiene en ambos casos es muy similar. Adicionalmente, se consigue mayor nitidez en las imágenes con *cycles* mayores.



5.8 EFECTO DE LA ATENUACIÓN

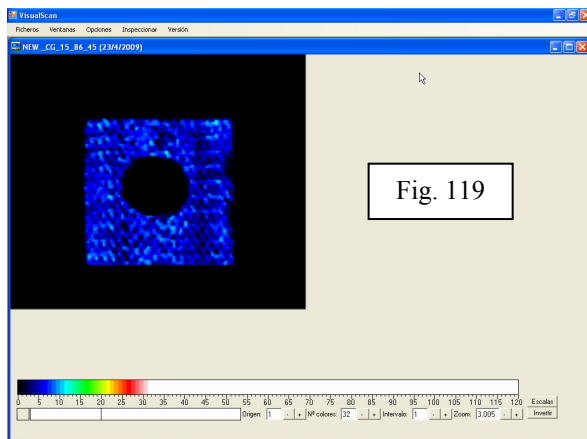
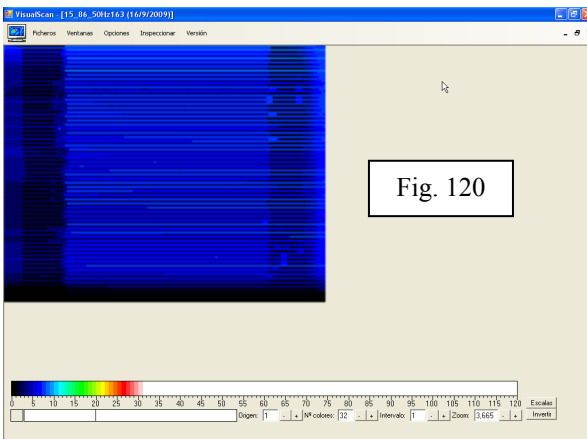
El efecto de la atenuación es disminuir la cantidad de energía procedente de la señal, para acotarla en unos límites, con el objetivo de que no se produzcan distorsiones, en la figura 70, se puede observar donde producen los efectos de la atenuación en el sistema completo. Si la señal es menos atenuada, el sistema recibe mayor energía y el sistema se mueve en otro nivel energético, y la configuración de colores observada, es distinta, como se puede observar en las figuras 117 y 118.

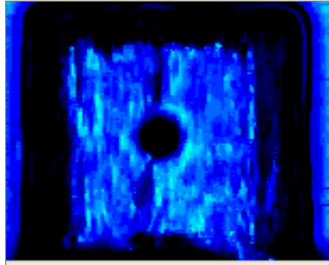
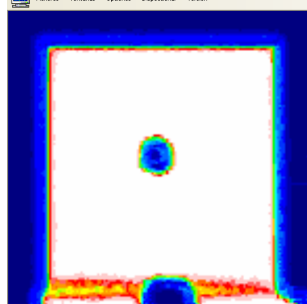
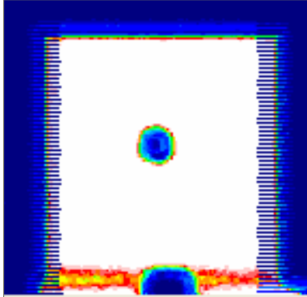
EFECTO DE LA ATENUACIÓN	
PROBETA CG-15-86 (30-04-2009)	
 <p>Fig. 117</p>	 <p>Fig. 118</p>
<p>FRECUENCIA: 225 kHz VELOCIDAD: 50 mm/s GAIN: 61.1 dB ATTEN: -60 dB</p>	<p>FRECUENCIA: 225 kHz VELOCIDAD: 50 mm/s GAIN: 54.3 dB ATTEN: -40 dB</p>

5.9 EFECTO DE LA FRECUENCIA DEL TRANSDUCTOR

Los resultados que se presentan en las figuras 119 y 120, ponen de manifiesto que la velocidad óptima de inspección no se mantiene para el caso de emplear otros transductores. Si se disminuye la velocidad de inspección los resultados presentados para el empleo de transductores de 50 kHz, figura 121, obtienen imágenes más difusas que cuando se utiliza el transductor de 225 kHz, que permite observar hasta la disposición de las fibras en las pieles (figura 119).

Por otra parte, si se utilizan transductores de mayor frecuencia, en particular 400 kHz, se obtienen imágenes con un contorno definido, como se puede observar en la figura 122. Además, si se aumenta la velocidad, como se ha observado en otros casos, comienzan a aparecer las “típicas líneas” de entradas y salidas del transductor al material, como se observa en la figura 123.

EFECTO DE LA FRECUENCIA DEL TRANSDUCTOR. PROBETA CG-15-86 (16-09-2009)	
PARÁMETROS DE LA INSPECCIÓN	IMAGEN OBTENIDA POR SOFTWARE
FRECUENCIA: 225 kHz INDEX: 1 mm VEL.: 163 mm/s TIEMPO: 198 s. (3 min. 18s.)	
FRECUENCIA: 50 kHz INDEX: 1 mm VEL.: 163 mm/s TIEMPO: 198 s. (3 min. 18s.)	

<p>FRECUENCIA: 50 kHz</p> <p>INDEX: 1 mm</p> <p>VEL.: 75 mm/s</p> <p>TIEMPO: 430 s. (7 min. 10s.)</p>	 <p>Fig. 121</p>
<p>FRECUENCIA: 400 kHz</p> <p>INDEX: 1 mm</p> <p>VEL.: 25 mm/s</p> <p>TIEMPO: 1292 s. (21 min. 32 s.)</p>	 <p>Fig. 122</p>
<p>FRECUENCIA: 400 kHz</p> <p>INDEX: 1 mm</p> <p>VEL.: 50 mm/s</p> <p>TIEMPO: 646 s. (10 min. 46 s.)</p>	 <p>Fig. 123</p>

5.10 EFECTO DEL DIÁMETRO DEL TRANSDUCTOR

Para evaluar la influencia del diámetro del transductor sería necesario disponer de al menos, dos juegos de transductores con la misma frecuencia y de diferente diámetro para mantener un parámetro fijo y el otro variable. En el laboratorio tan sólo se dispone de 4 pares de transductores (emisor y receptor) de frecuencias 50, 120, 225 y 400 kHz. Por tanto, no ha sido posible determinar este efecto.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

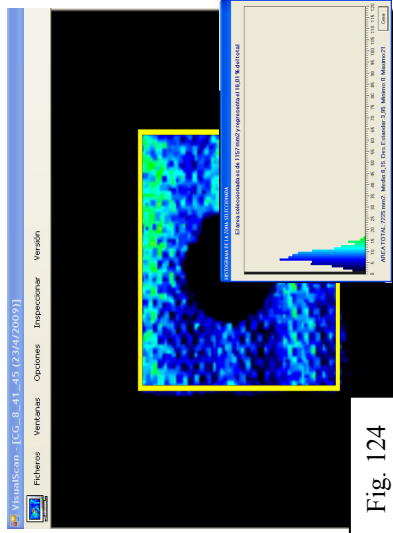
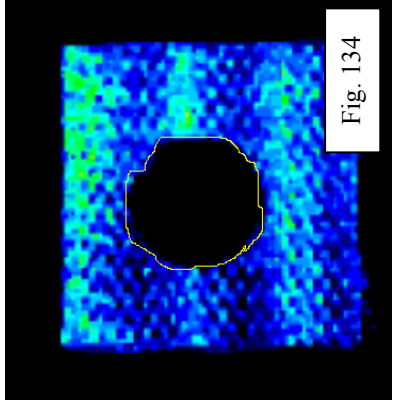
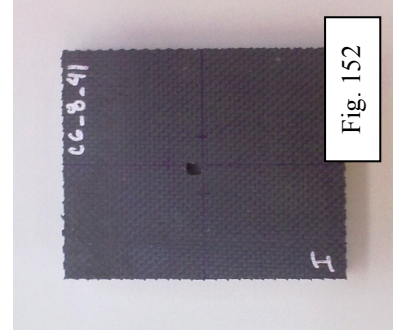
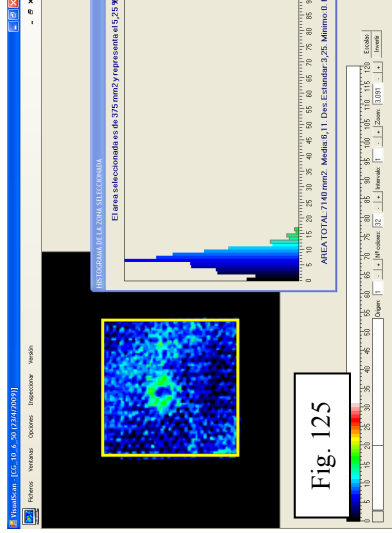
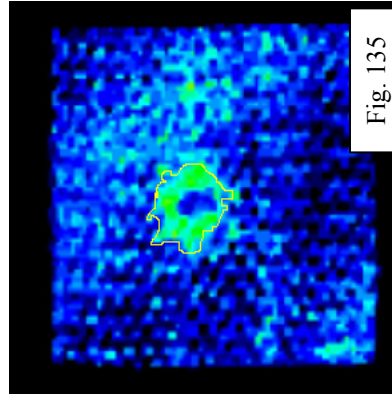
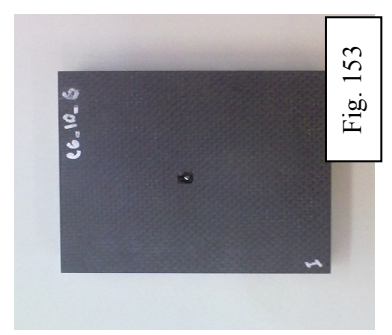
En este capítulo, se va a proceder al estudio o determinación experimental del área dañada de probetas previamente impactadas. Para ello, se utilizará la técnica de inspección por ultrasonidos con acoplamiento de aire. Mediante esta técnica se obtienen imágenes que posteriormente se tratarán mediante dos métodos distintos, por un lado, con el software incorporado en el equipo *C-scan* (*método de los histogramas*) y por otro lado, mediante *ImageJ* software adecuado para calcular el porcentaje de área dañada sobre el total. Se establecerá una comparativa entre ambos métodos, con objeto de verificar si ambos métodos obtienen áreas semejantes, y si se puede afirmar según se expuso en el punto 4.5 del presente proyecto, que el software *ImageJ*, determina porcentajes de áreas más exactos.

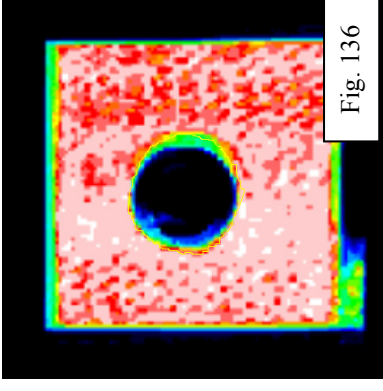
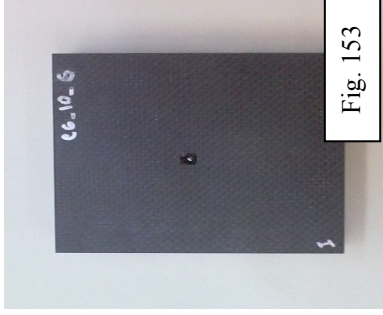
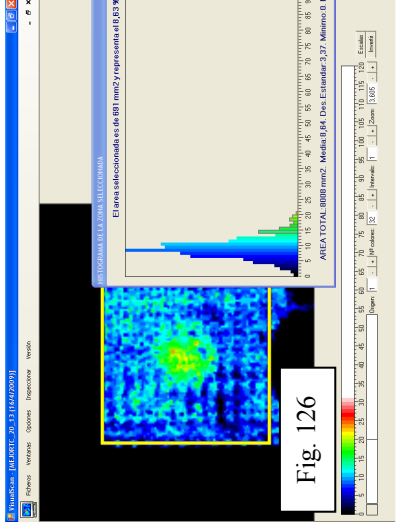
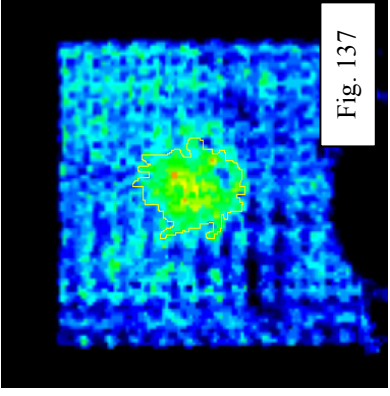
Primeramente, en la zona izquierda de la tabla se presentan los resultados obtenidos para el cálculo del área dañada mediante el *método de los histogramas* de acuerdo a la metodología expuesta en el punto 4.5, del presente proyecto. En la serie de figuras de la 124 a la 133, se muestran las imágenes que determinan el área mediante el *método de los histogramas*.

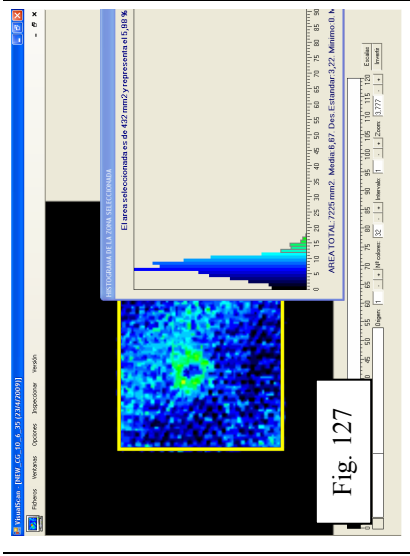
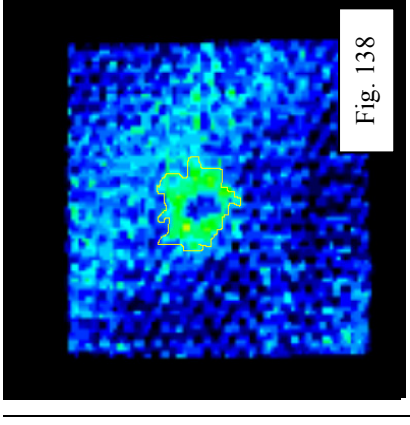

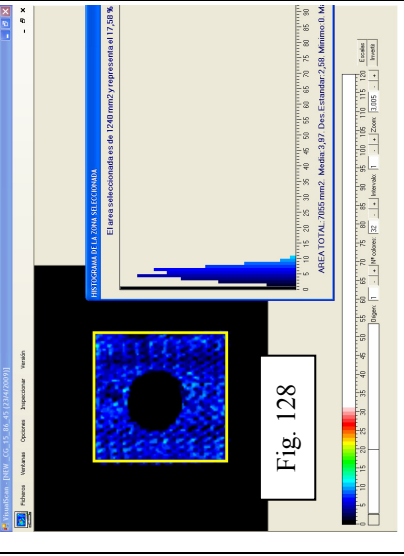
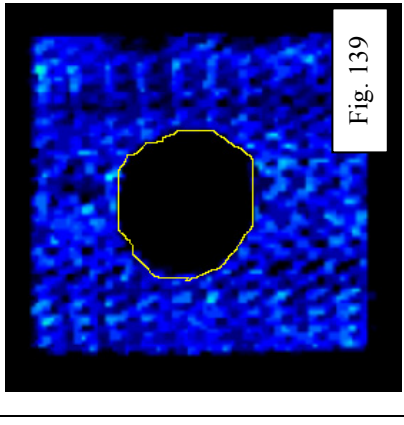
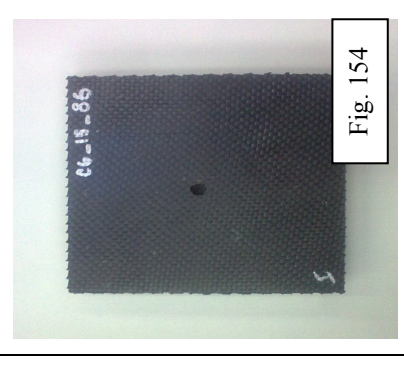
En segundo lugar, en la zona derecha de la tabla se presentan los resultados y las imágenes (serie de figuras de la 134 a la 151) del área dañada, utilizando el método alternativo de cálculo de áreas mediante *ImageJ*.

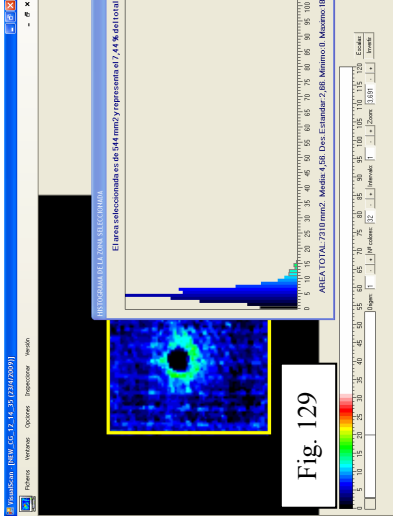
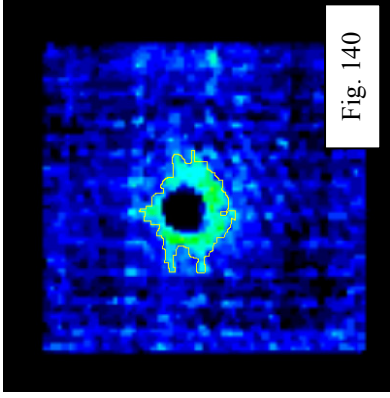
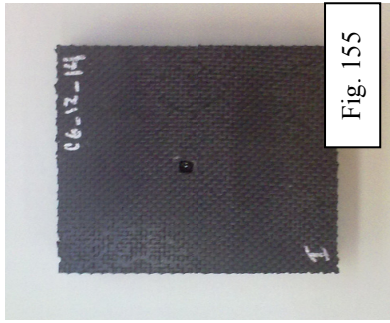
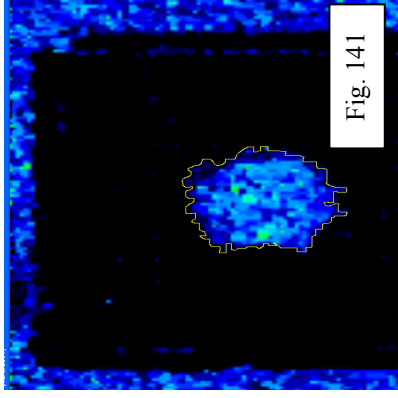

Adicionalmente, en las figuras de la 152 a la 156 se presentan algunas fotografías de las muestras inspeccionadas. Se puede comprobar que el área dañada obtenida por el *C-scan* es mucho mayor de lo que se puede observar visualmente.

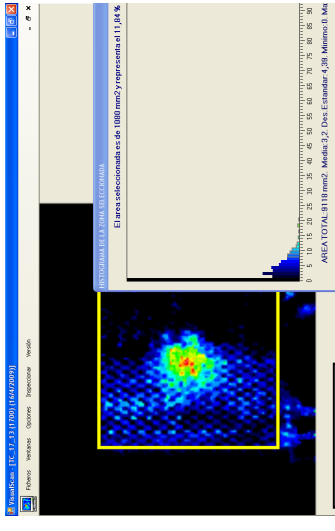
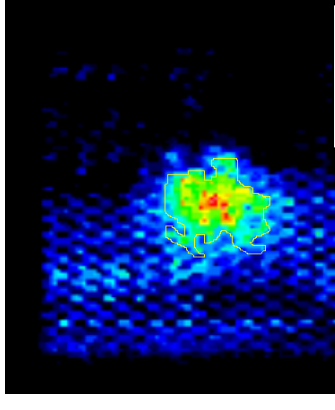
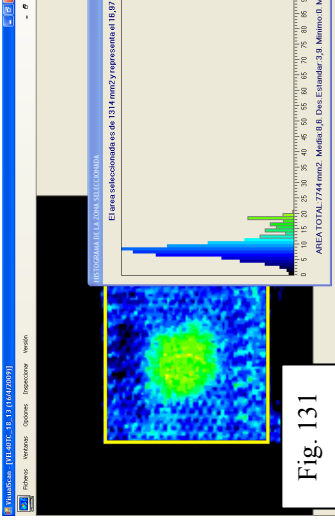
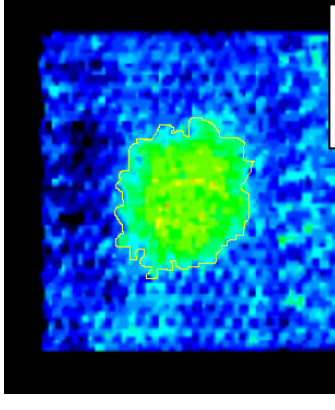
A la vista de los resultados presentados, se puede determinar que para una misma probeta el área dañada depende del transductor empleado, cómo se puede observar en las figuras 139, 145, 149 y 151.

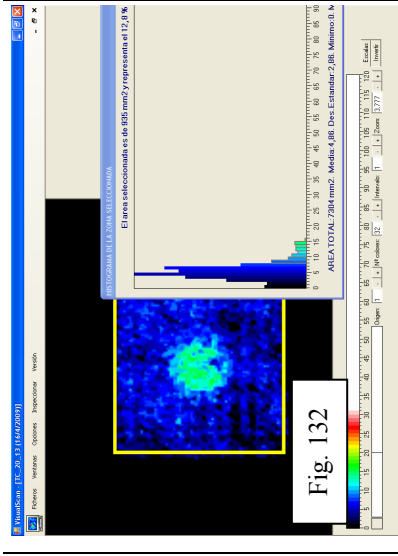
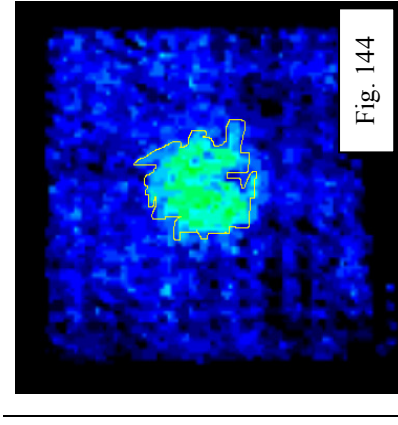
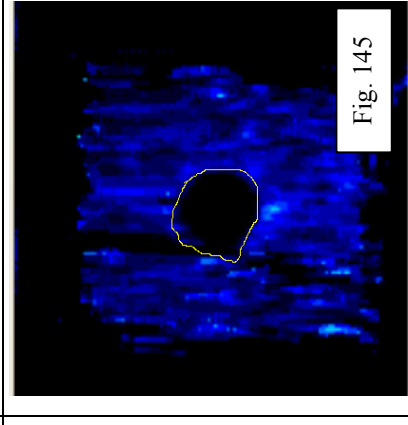
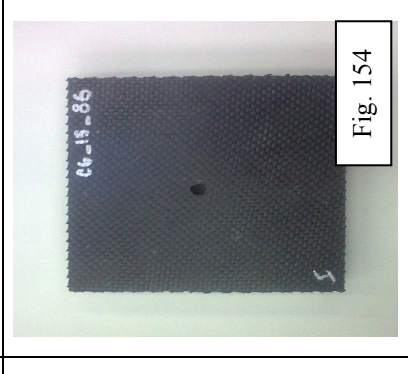
MÉT.1 - Histogramas				MÉT.2 - ImageJ			
Parámetros de la inspección	Área dañada (mm ²)	Área dañada (%)	Imagen de histogramas	Área dañada (mm ²)	Área dañada (%)	Imagen analizada por ImageJ	Fotografía
Inspección no.: 1 Frecuencia: 225 kHz Probeta: CG-8-41 Archivo: CG_8_41_45.bmp	1157	16,0	 <p>Fig. 124</p>	3132,8	16,0	 <p>Fig. 134</p>	 <p>Fig. 152</p>
Inspección no.: 2 Frecuencia: 225 kHz Probeta: CG-10-6 Archivo:CG_10_6_50. bmp	375	5,3	 <p>Fig. 125</p>	845,4	4,3	 <p>Fig. 135</p>	 <p>Fig. 153</p>

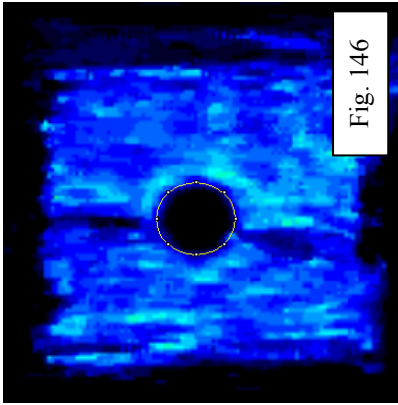
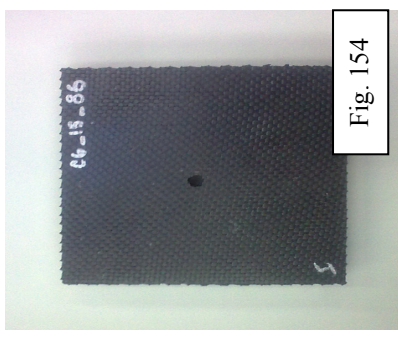
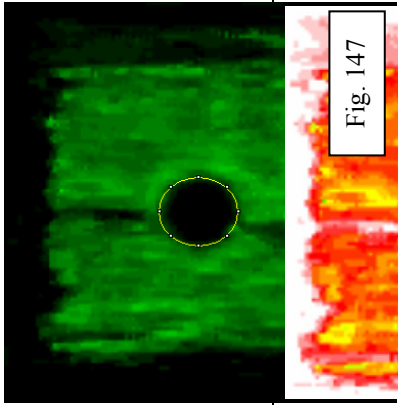
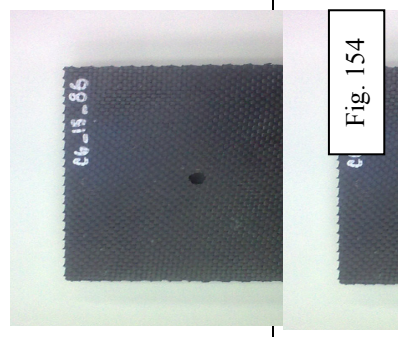
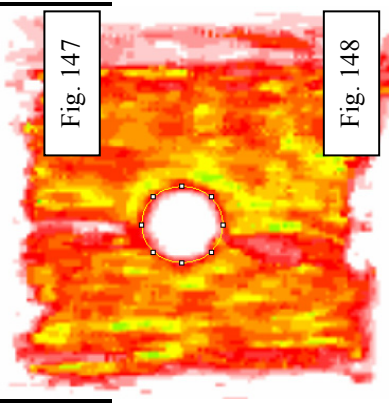
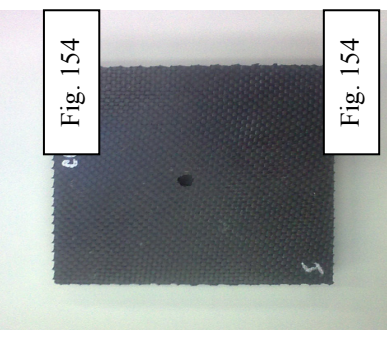
<p>Inspección no.: 3</p> <p>Frecuencia: 225 kHz</p> <p>Probeta: CG-10-6</p> <p>Archivo: CG_15_86_V50_G61 1_A60_CYCLE10.bm p</p>	<p>–</p>	<p>–</p>	<p>El software tiene problemas para analizar la imagen</p>	<p>2407,3</p>	<p>12,3</p>	 <p>Fig. 136</p>	 <p>Fig. 153</p>
<p>Inspección no.: 4</p> <p>Frecuencia: 225 kHz</p> <p>Probeta: TC-20-13</p> <p>Archivo: MEJORTC_20_13.bm p</p>	<p>691</p>	<p>8,6</p>	 <p>Fig. 126</p>	<p>1599,6</p>	<p>8,2</p>	 <p>Fig. 137</p>	<p>No se dispone de fotografía</p>

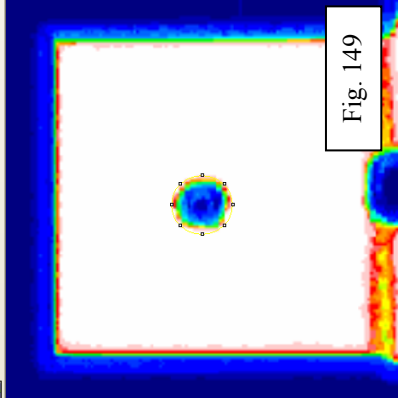
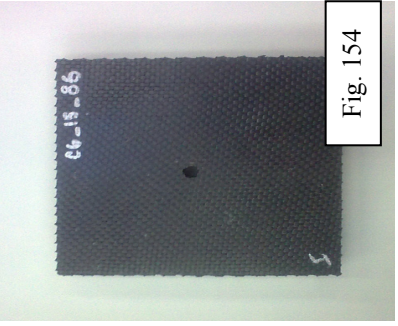
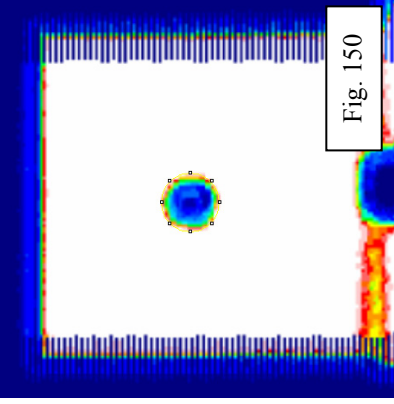
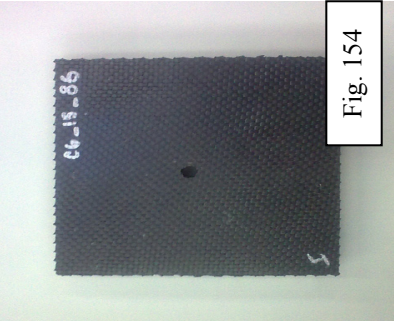
<p>Inspección no.: 5 Frecuencia: 225 kHz Probeta: CG-10-6 Archivo: NEW_CG_10_6_35.b mp</p>	<p>432</p>	<p>6,0</p>	 <p>Fig. 127</p>	<p>974,0</p>	<p>5,0</p>	 <p>Fig. 138</p>	 <p>Fig. 153</p>
<p>Inspección no.: 6 Frecuencia: 225 kHz Probeta: CG-15-86 Archivo: NEW_CG_15_86_50. bmp</p>	<p>1240</p>	<p>17,6</p>	 <p>Fig. 128</p>	<p>2992,4</p>	<p>15,3</p>	 <p>Fig. 139</p>	 <p>Fig. 154</p>

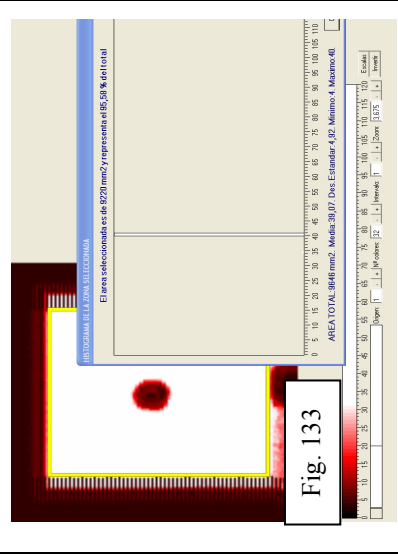
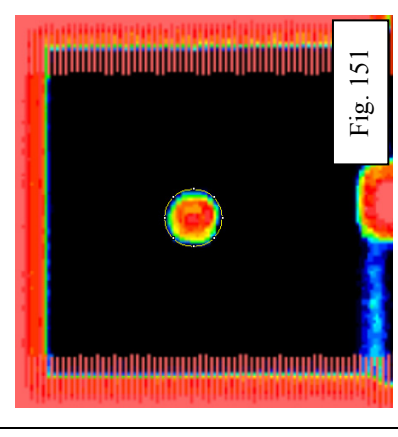
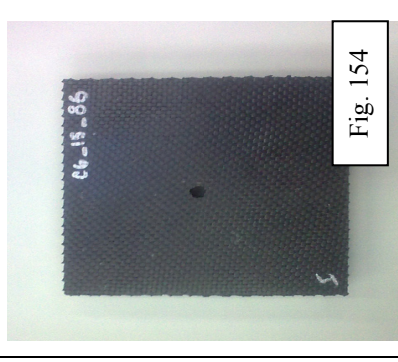
<p>Inspección no.: 7</p> <p>Frecuencia: 225 kHz</p> <p>Probeta: CG-12-14</p> <p>Archivo: NEW_CG_12_14_35. bmp</p>	544	7,4	 <p>Fig. 129</p>	1177,8	6,0	 <p>Fig. 140</p>	 <p>Fig. 155</p>
<p>Inspección no.: 8</p> <p>Frecuencia: 225 kHz</p> <p>Probeta: P-15-01</p> <p>Archivo: probetaP1501.bmp</p>	—	—	<p>No se ha podido recuperar esta inspección</p>	1602,7	8,2	 <p>Fig. 141</p>	 <p>Fig. 156</p>

Inspección no.: 9 Frecuencia: 225 kHz Probeta: TC-17-13 Archivo: TC_17_13.bmp	1080	11,6	 <p>Fig. 130</p>	1142,0	5,8	 <p>Fig. 142</p>	No se dispone de fotografía
Inspección no.: 10 Frecuencia: 225 kHz Probeta: TC-18-13 Archivo: TC_18_13.bmp	1314	17,0	 <p>Fig. 131</p>	3224,6	16,5	 <p>Fig. 143</p>	No se dispone de fotografía

<p>Inspección no.: 11 Frecuencia: 225 kHz Probeta: TC-20-13 Archivo: TC_20_13.bmp</p>	<p>935</p>	<p>12,8</p>	 <p>Fig. 132</p>	<p>1654,4</p>	<p>8,4</p>	 <p>Fig. 144</p>	<p>No se dispone de fotografía</p>
<p>Inspección no.: 12 Frecuencia: 50 kHz Probeta: CG-15-86 Archivo: 15_86_50Hz50.bmp</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>Se considera que el área determinada tendría mucho error debido a la gran cantidad de negros que aparecen en la imagen.</p>	<p>1453,8</p>	<p>7,4</p>	 <p>Fig. 145</p>	 <p>Fig. 154</p>

Inspección no.: 13 Frecuencia: 50 kHz Probeta: CG-15-86 Archivo: 15_86_50Hz75.bmp	-	-	El software tiene problemas para analizar la imagen	974,8	5,0	 <p>Fig. 146</p>	 <p>Fig. 154</p>
Inspección no.: 14 Frecuencia: 50 kHz Probeta: CG-15-86 Archivo: 15_86_50Hz75green.bmp	-	-	El software tiene problemas para analizar la imagen	985,3	5,0	 <p>Fig. 147</p>	 <p>Fig. 154</p>
Inspección no.: 15 Frecuencia: 50 kHz Probeta: CG-15-86 Archivo: 15_86_50Hz75red.bmp	-	-	El software tiene problemas para analizar la imagen	975,6	5,0	 <p>Fig. 148</p>	 <p>Fig. 154</p>

<p>Inspección no.: 16</p> <p>Frecuencia: 400 kHz</p> <p>Probeta: CG-15-86</p> <p>Archivo: 15_86_400Hz25.bmp</p>	426	4,4	<p>El software tiene problemas para analizar la imagen, se analiza el archivo 15_86_400Hz50inv.bmp con configuración inversa de colores.</p>	571,8	2,9	 <p>Fig. 149</p>	 <p>Fig. 154</p>
<p>Inspección no.: 17</p> <p>Frecuencia: 400 kHz</p> <p>Probeta: CG-15-86</p> <p>Archivo: 15_86_400Hz50.bmp</p>	426	4,4	<p>El software tiene problemas para analizar la imagen, se analiza el archivo 15_86_400Hz50inv.bmp con configuración inversa de colores.</p>	526,7	2,7	 <p>Fig. 150</p>	 <p>Fig. 154</p>

<p>Inspección no.: 18</p> <p>Frecuencia: 400 kHz</p> <p>Probeta: CG-15-86</p> <p>Archivo: 15_86_400Hz50inv.b mp</p>	<p>426</p>	<p>4,4</p>	 <p>Fig. 133</p>	<p>526,2</p>	<p>2,7</p>	 <p>Fig. 151</p>	 <p>Fig. 154</p>
---	------------	------------	---	--------------	------------	---	--

Adicionalmente a la inspección no. 18, figura 133, se procede a comentar de nuevo como se determina el área dañada experimentalmente por el método 1 (*método de los histogramas*), expuesto en el punto 4.5, del presente proyecto, ya que en este caso, se ha invertido la configuración de colores.

La imagen que se usa para el cálculo mediante histogramas es la misma figura que la 151, pero empleando una configuración inversa de colores, ésta se puede observar en la figura 157:

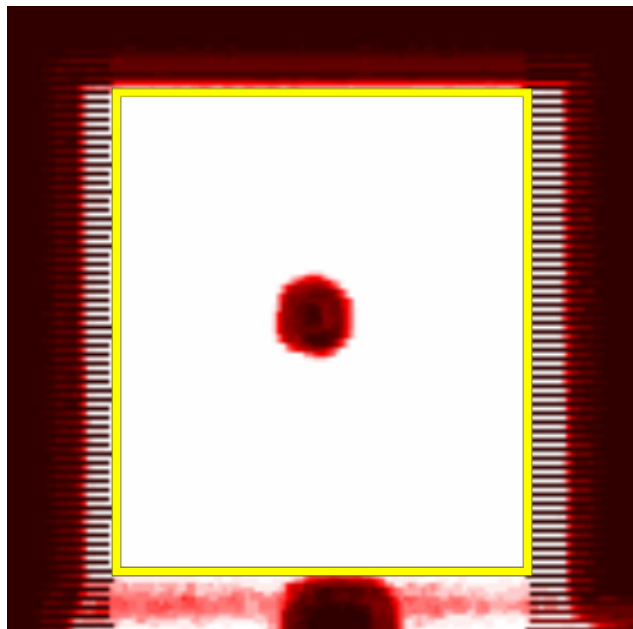


Fig. 157. Selección de zona para el cálculo de área dañada mediante histograma.

En la figura 158, se observa, una nueva limitación en el software, no aparecen barras correspondientes a los diferentes rojos. En esta ocasión, se procede de la siguiente forma, se selecciona todo lo blanco y todo lo que no sea blanco corresponde al área dañada, es decir, para el caso presentado, el blanco representa un área del 95,6 %. Por tanto, por diferencia el área dañada representa el 4,4 % ($100 \% - 95,6 \% = 4,4 \%$).

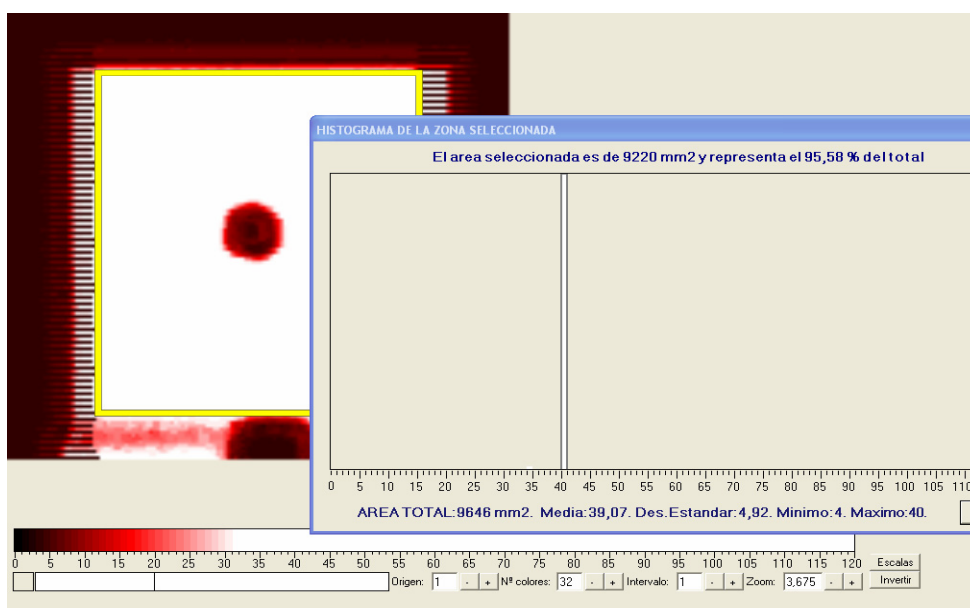


Fig. 158. Histograma de la zona seleccionada.

Luego, comparando el área dañada por ambos métodos, se obtiene un 4,4 % para el caso de emplear el método de los histogramas, frente a un 2,7 %, obtenido para la misma imagen, mediante el software *ImageJ*. Por tanto, como ya se había presentado anteriormente, el área que determina el método de los histogramas es siempre mayor a la calculada mediante el software *ImageJ*.

Adicionalmente, a la comparación de los dos métodos anteriores, se propone estudiar la muestra a partir de un análisis fotográfico y posterior análisis mediante *ImageJ* con la intención de determinar el área dañada. B. L. Buitrago, ya expuso este método de cálculo de áreas dañadas en [16] para material compuesto tipo sándwich con pieles de fibra de vidrio tipo E reforzado con matriz de resina de tipo poliéster y núcleo de espuma de policloruro de vinilo (PVC).

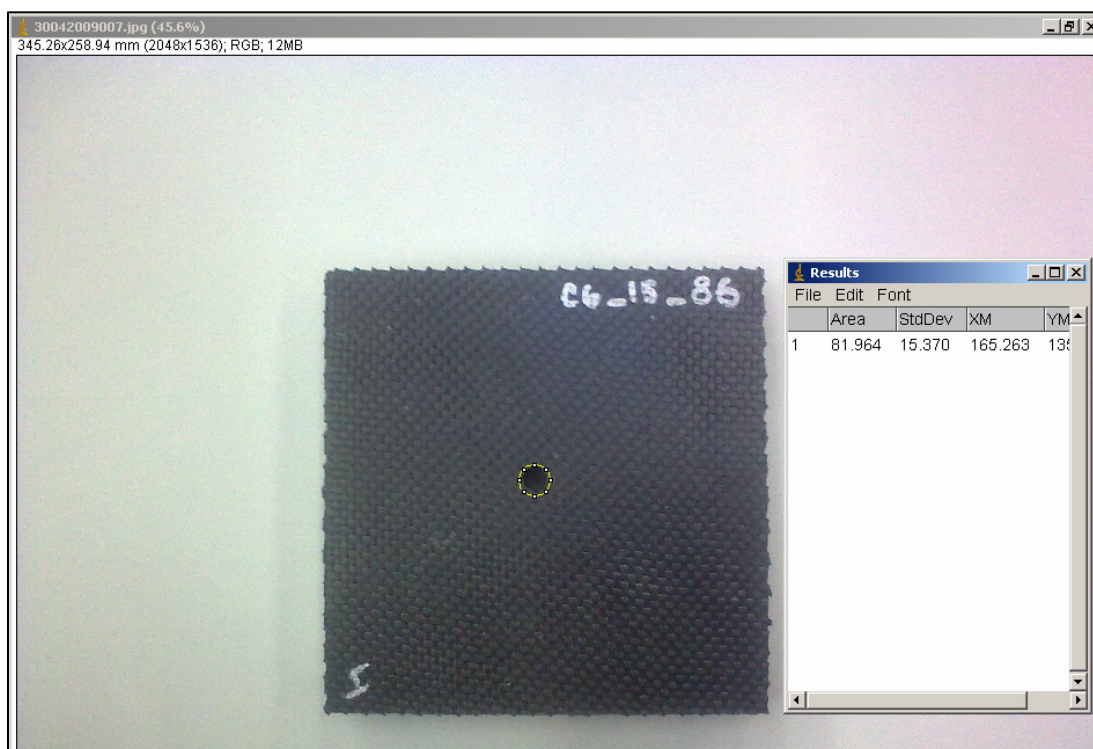


Fig. 159. Área visual dañada.

Mediante *ImageJ*, se determina el área visual dañada, esta área representa el 0,42 % del total ($\frac{81,964}{19600} \times 100 = 0,418\%$). Por tanto, de los resultados que han sido analizados anteriormente se determina que el área dañada ha de considerarse mucho mayor, que lo que se pueda determinar del análisis fotográfico. Se recuerda que, para la misma probeta impactada mediante otros métodos se han obtenido valores del 4,4 % (*método de los histogramas*) o del 2,7 % mediante análisis de la imagen del *C-scan* mediante *ImageJ*.

En último lugar, para validar los resultados obtenidos mediante el software *ImageJ* y determinar que este método es más exacto que el *método de los histogramas*, se propone determinar el área total de una de las probetas de estudio. Se recuerda que, todas las probetas tienen un área de 140 mm x 140 mm, es decir, 19600 mm². En la figura 160, se puede observar que el área total determinada por *ImageJ*, resulta ser 19602,144 mm². Es decir, el error es tan sólo del 0,01 %.

Por esta razón, el método de cálculo de áreas mediante *ImageJ* se considera más exacto.

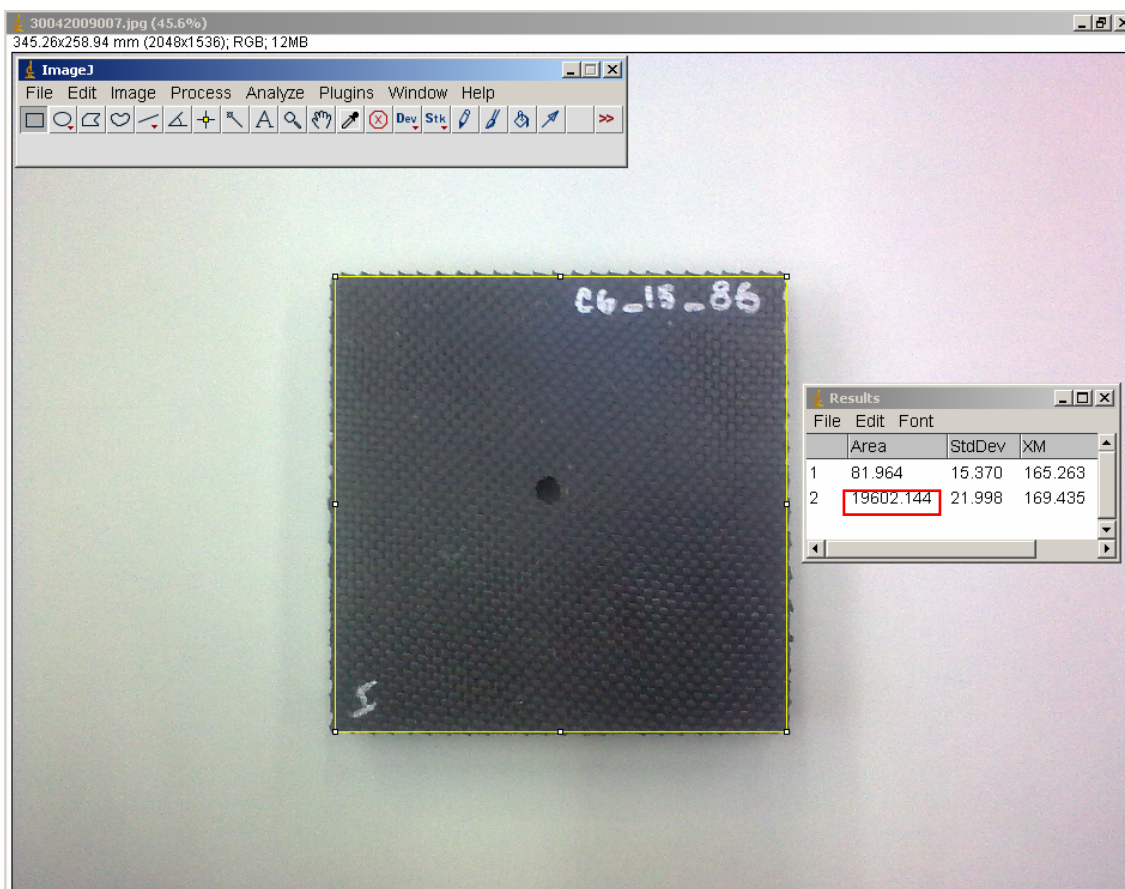


Fig. 160. Área total calculada por *ImageJ*.

7 METODOLOGÍA DE ENSAYO

Esta metodología es válida para inspeccionar mediante el equipo de inspección por ultrasonidos con acoplamiento de aire materiales compuestos tipo sándwich con pieles de fibra de carbono embebida en matriz de resina epoxi y núcleo panel de abeja de aluminio (*honeycomb* de aluminio), de dimensiones 140 mm x 140 mm. En principio, se puede inspeccionar muestras mayores en área, pero de espesor similar al considerado, 20 mm para el núcleo y 2 mm para cada piel, en total, 24 mm. El espesor a inspeccionar está limitado, no sólo por las limitaciones físicas de la técnica empleada, sino también por el utillaje empleado. Como se puede observar en las figuras 161 y 162.



Fig. 161. Limitación del utillaje.

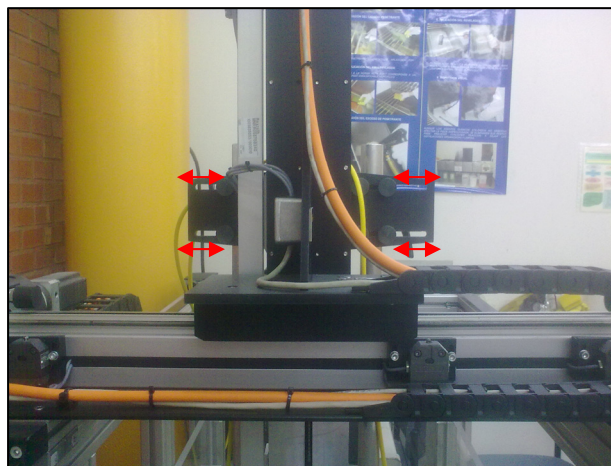


Fig. 162. Vista trasera. Limitación utillaje.

7.1 POSICIONAMIENTO DE LA PROBETA

Con objeto de que los transductores no toquen el fondo de la bañera y para evitar su golpeo se recomienda conseguir que, la probeta quede elevada de forma que los transductores en su movimiento puedan llegar hasta el final de la misma. En los estudios realizados se han empleado unos “calzos” de un polímero termoestable y han dado buen resultado, en la figura 163 se observan dichos “calzos”.

Una de las primeras consideraciones es conocer los ejes de trabajo, estos han sido expuestos en las figuras 60 y 61.

Conocidos los ejes de trabajo, se debe colocar la probeta a inspeccionar, y no es una tarea sencilla, pues de cómo se posicione la probeta dependerá probablemente la calidad de la inspección realizada. En realidad, dependiendo de los transductores que se utilicen, se debe posicionar la probeta a una distancia u otra. Aunque estos temas pueden ser parcialmente solucionados con el sistema de control de ejes gobernado por el PC. El sistema de inspección, permite realizar inspecciones automáticas, pero si la probeta no está elevada, los transductores no pueden llegar a inspeccionar el final de la

misma, y el sistema de control puede tocar el fondo del “cofre” de inspección, pudiendo dañar el sistema de inspección.

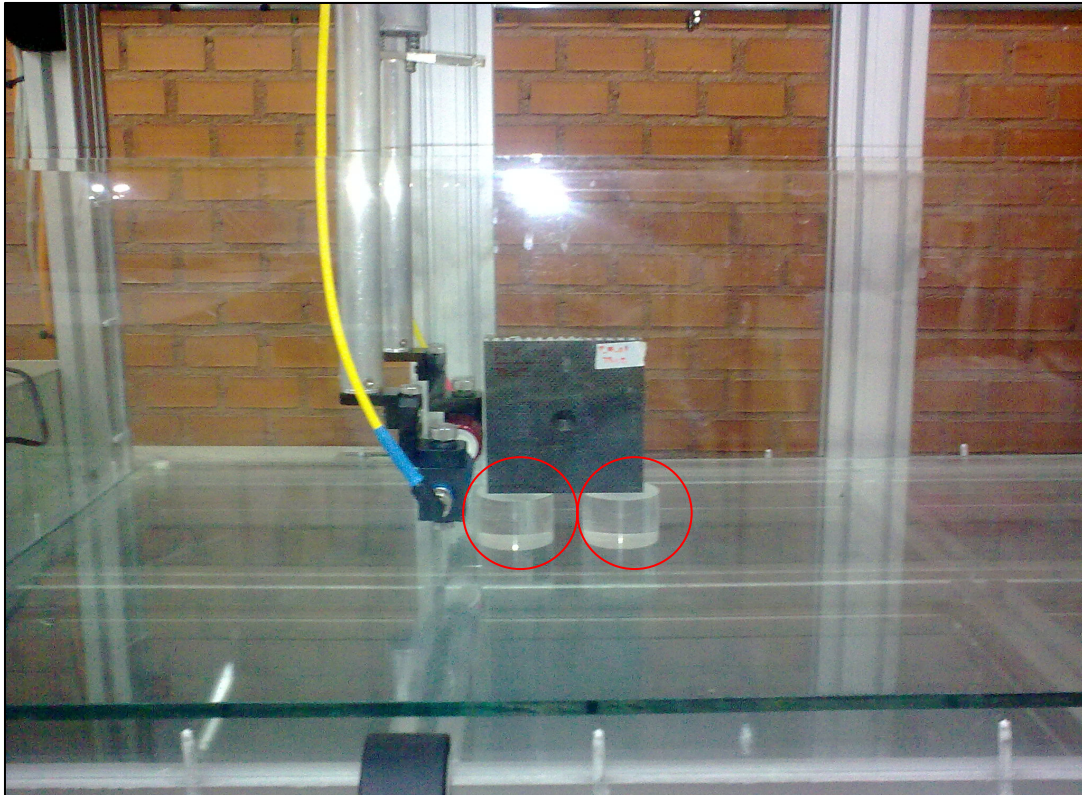


Fig. 163. Equipo durante una inspección con probeta calzada.

7.2 POSICIONAMIENTO DE LOS TRANSDUCTORES

Este punto tiene una importancia “crucial”, pues con un mal posicionamiento de los transductores se podrían obtener malos resultados. En función del tipo de material empleado y de la frecuencia del transductor, habrá que determinar una distancia entre los mismos. Para el material empleado, los transductores de 225 kHz han dado buenos resultados. Generalmente se suele cometer el error de pensar que, distancias simétricas con respecto a la muestra obtienen buenos resultados, pero esta afirmación no siempre es cierta. De hecho, los mejores resultados en este proyecto se obtienen con cierta asimetría, como se puede observar en la figura 164.

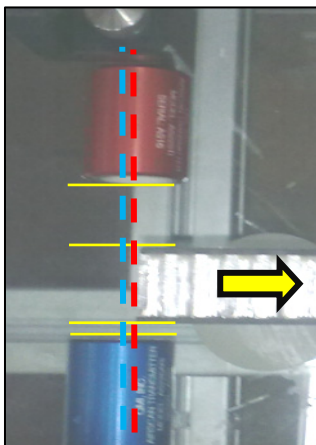


Fig. 164. Asimetría en el posicionamiento de los transductores.

En línea discontinua roja ha sido representada la línea central del transductor receptor, y en azul discontinua la línea central del transmisor. La flecha amarilla representa la dirección en la que se lleva a cabo la inspección. Adicionalmente, en líneas amarillas se delimita la distancia del transductor a la pieza de inspección, se puede observar que esta distancia es claramente asimétrica.

Para determinar la distancia óptima a la que corresponde situar los transductores con respecto a la pieza, es necesario recurrir a la documentación técnica aportada por el fabricante [3]. A continuación se muestra el gráfico correspondiente al transductor transmisor de 225 kHz (figura 165):

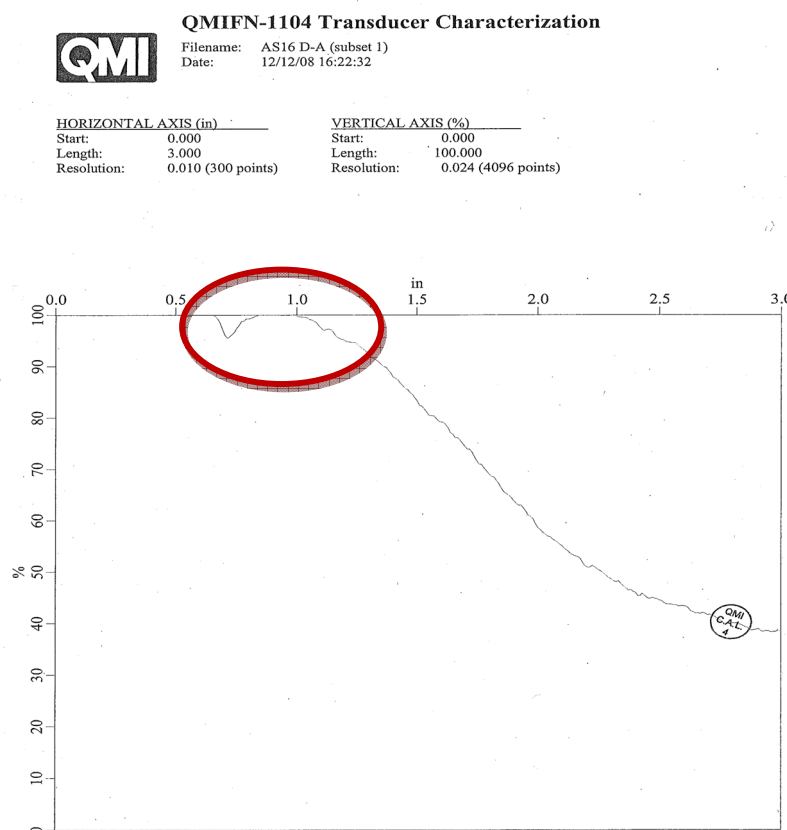


Fig. 165. Caracterización del transductor transmisor de 225 kHz. Imagen tomada de [3].

En el gráfico se recomienda situar el transmisor a una distancia comprendida entre 0.5" y 1" (evitándose el mínimo que se produce a una distancia de 0.6"). En el caso del transductor receptor, la distancia que se recomienda es de una pulgada, según se puede observar en la figura 166.

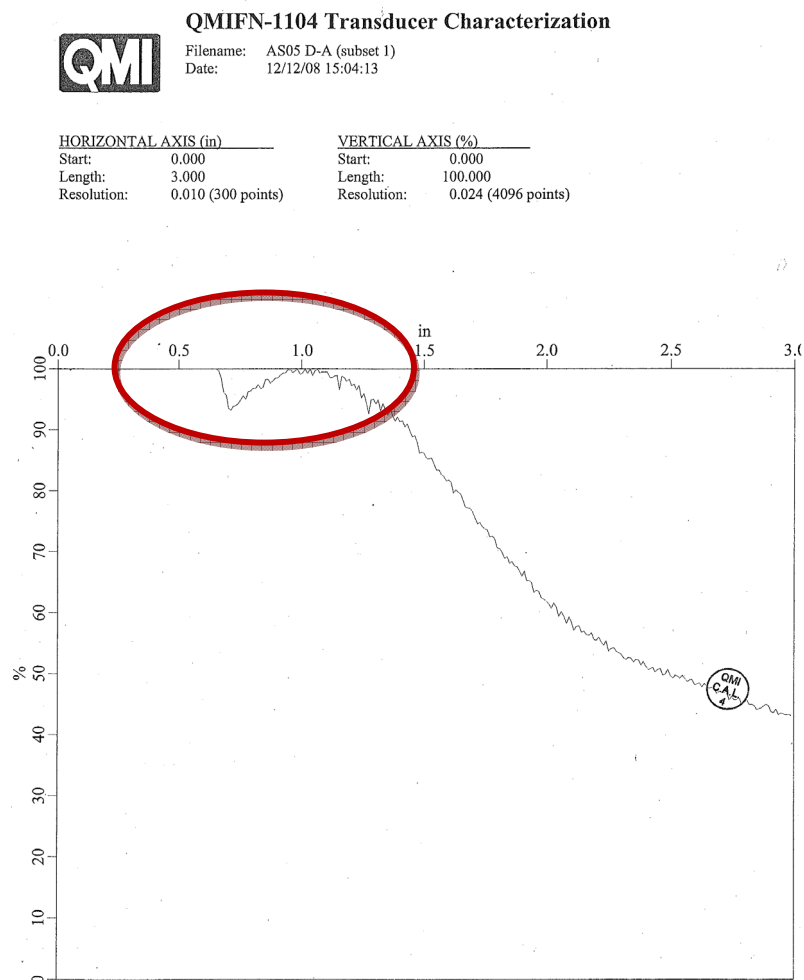


Fig. 166. Caracterización del transductor receptor de 225 kHz. Imagen tomada de [3].

Por tanto, se podría dar el caso de ciertas asimetrías entre transmisor y receptor. Como se muestra en la figura 164, en donde se observa el transmisor situado a una distancia de media pulgada y el receptor a una distancia de una pulgada, de la pieza sometida a la inspección.

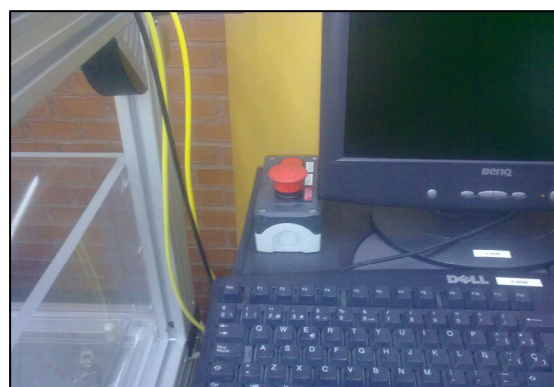
7.3 ENCENDIDO Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA

El primer paso consiste en enchufar el equipo, después, se conecta el sistema mediante el giro hacia la derecha de la ruleta roja, en la figura 167, se puede ver la ruleta, y la luz de encendido para motor X, motor Y y motor Z.



Fig. 167. Armario eléctrico para las conexiones del motor.

Luego se enciende el PC, que actúa como sistema de adquisición de datos, y como órgano de control del movimiento de los brazos de inspección. Su encendido es análogo a cualquier computadora. Posteriormente se procede a encender la sonda (botón O/I). A continuación, se arman los brazos, pulsando el botón “REARMAR MOTORES”, pulsador que se puede observar en la figuras 168 y 169. Ahora, ya se está en disposición de usar el equipo para realizar una inspección. En este momento, se puede oír un ligero “zumbido”. Ante cualquier problema o incidencia, accionar la seta de emergencia.



Figs. 168 y 169. Botones y seta de emergencia. Ubicación de la seta de emergencia.

Una vez arrancado el equipo, en el PC se ajustará los parámetros del software, según se expuso en el capítulo 4.3 del presente proyecto.

Posteriormente, se limitan los movimientos de los ejes y se ajustan a las dimensiones de la muestra (en el software *Setup Scan*), y tras posicionar correctamente la muestra y los transductores se procede a configurar los parámetros básicos del software *Visual Scan*, para el material considerado se ha determinado una inspección con una **velocidad óptima de barrido de 163 mm/s** y un **index de 1 mm**, para transductores de 225 kHz. Con esta configuración de parámetros se obtiene un tiempo total de inspección de 3 minutos con 18 segundos.

7.4 AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE LA SONDA

El ajuste los diferentes parámetros de la sonda, resulta ser generalmente una de las tareas más complicadas y delicadas de una inspección. Existen muchas variables, y cada una tiene un efecto. En el capítulo de resultados (capítulo 5) se puede observar los efectos de las modificaciones de la mayoría de ellas. Así mismo, es necesario tener en mente el diagrama de bloques presentado en la figura 69.

Para cada tipo de material existe una determinada configuración en las variables de inspección que obtiene las mejores imágenes. El método de configuración más sencillo, es ir variando los diferentes parámetros de configuración, hasta obtener una representación en la sonda según la especificación técnica del equipo [3] que depende del tipo de material y debe tener la mayor analogía con la figura 170, se debe hacer especial “hincapié” en las opciones de la puerta (*GATE SETTING*):

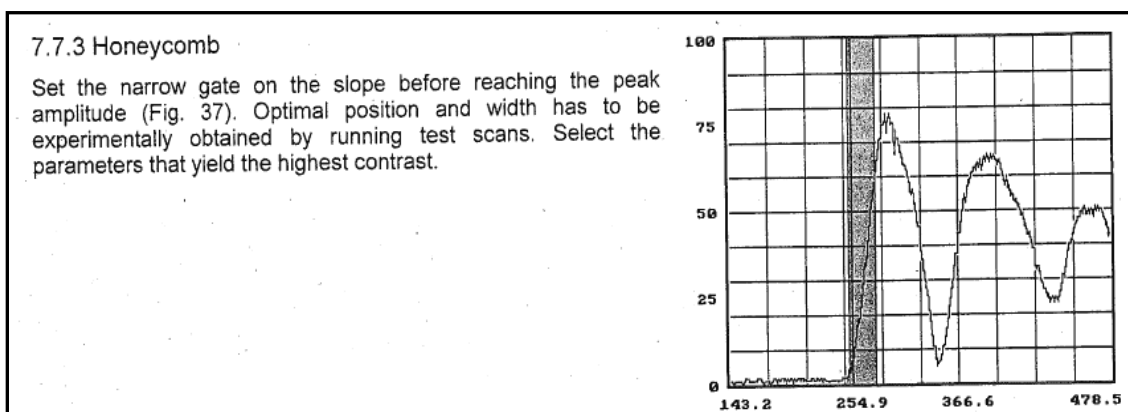


Fig. 170. Configuración de la puerta (*gate*) para materiales tipo honeycomb. Imagen tomada de [3].

Además de seguir los pasos que se recomiendan en la página 17 de la especificación técnica de la sonda 007CX [3]. A continuación, en la tabla 7, se sugieren algunos ajustes de las variables que han dado buenos resultados para el material considerado y para los transductores de 225 kHz. Estos valores no son más que un simple ejemplo de una de las inspecciones, es sin duda, la práctica y la experiencia, la que hace seleccionar los parámetros más óptimos para conseguir los mejores resultados e imágenes.

DISPLAY		GATE/ALARM		RECEIVER		TRANSMITTER	
DELAY	33.9	DELAY	212.8	GAIN	44.4 dB	FREQ	225 kHz
RANGE	566.5	WIDTH	63.5	ATTEN	20 dB	CYCLE	5
PRF	150 Hz	LEVEL	0%				
RATE	10 MHz	PEAK	100%	Tune (Recv)	49%	Tune (Xmit)	51%
SHAPE	1	AL_ST	OFF				

Tabla 7. Recomendación de algunos valores para el material de estudio y transductores de 225 kHz.

7.5 RESUMEN PARÁMETROS DE INSPECCIÓN

A modo de resumen en este apartado se proponen valores diferentes parámetros de inspección:

- **Frecuencia del transductor:** para el material considerado la frecuencia de 225 kHz, permite obtener imágenes con una calidad y resolución bastante buenas, permitiendo observar las fibras de las pieles (figura 119). Si se emplean frecuencias menores, como por ejemplo la de 50 kHz (figura 121), el haz de divergencia es más amplio y se obtienen imágenes menos nítidas y se pierde la resolución de las pieles. Para frecuencias mayores, se consideró el caso de 400 kHz (figura 122), para esta frecuencia el haz del transductor es más estrecho y permite obtener imágenes más contorneadas, tampoco se han observado las fibras de las pieles para estas frecuencias.
- **Velocidad de barrido:** aunque se ha determinado la velocidad óptima para el material empleado y la frecuencia de 225 kHz, en general, la velocidad de inspección de 50 mm/s ha dado buenos resultados en el ámbito de todas las frecuencias consideradas, siendo esta velocidad un parámetro crítico de inspección, pues velocidades de inspección lentas no obtienen mejores resultados y determinan tiempos de inspección para una pieza demasiado altos. En cambio velocidades muy altas, pueden dejar de obtener buenos resultados y dejar inadvertidas áreas dañadas. Por esta razón se determinó una velocidad óptima de inspección en la serie de figuras de la 101 a la 107 se puede observar el efecto.
- **Index:** no se han determinado buenos resultados modificando el valor por defecto de 1 mm, aunque se consiguieran tiempos de inspección más rápidos al modificar este parámetro, no consigue buenos resultados como se puede observar en las figuras de la 97 a la 100.
- **Ganancia y atenuación de la sonda:** con ganancias elevadas se puede mover uno en otra configuración de colores, aunque el ruido generado también aumenta, adicionalmente se puede atenuar la señal recibida, para mantener esta dentro de unos límites. Para el material considerado ganancias comprendidas entre los 40 y los 60 dB, y atenuaciones que permitan observar en la sonda la señal con suficiente claridad, -20 y -40 dB, han conseguido buenos resultados.
- **Anchura de la puerta (width):** si se estrecha mucho este parámetro en general obtiene mejores resultados, la idea es capturar donde se producen los cambios de la señal recibida, y debe estar ubicada según se indica en [3]. En las figuras 113 y 114 se observan dos configuraciones distintas una más estrecha de valor 17 μ s figura 114, obtiene la imagen mejor definida y otra con la puerta más amplia figura 113.
- **Cycle:** los valores de configuración de este parámetro dependen de la frecuencia del transductor empleado, siendo 1, un valor siempre disponible. Se recomienda poner el máximo valor que permita para el transductor empleado. En la figura 115 y 116 se puede observar dos ejemplos y los efectos que se producen en la imagen capturada.

8 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

8.1 CONCLUSIONES

- ❖ Experimentalmente se ha determinado para los transductores de 225 kHz y para el material estudiado, compuesto tipo sándwich con pieles de fibra de carbono embebidas en matriz de resina epoxi y núcleo panal de abeja de aluminio (*honeycomb* de aluminio) la **velocidad óptima de inspección**, así como el paso (*index*) de la misma, siendo estos valores de **163 mm/s** y **1 mm**, respectivamente. Consiguiendo tiempos de inspección del orden 2 horas y media por cada metro cuadrado de material inspeccionado. Adicionalmente, el transductor de 225 kHz, permite observar las fibras con suficiente resolución. Para otras frecuencias, las fibras no han sido observadas.
- ❖ El área dañada obtenida en las diferentes inspecciones no depende de la velocidad de inspección, siempre y cuando esta sea menor de la considerada óptima (163 mm/s) para los transductores de 225 kHz, pues con valores de velocidad más altos, dejan de obtenerse imágenes.
- ❖ La velocidad óptima de inspección depende del transductor empleado. Para el material de estudio y para otras frecuencias, la velocidad de 163 mm/s, no muestra el defecto.
- ❖ Aunque representen tiempos de inspección muy altos, la velocidad de barrido de 50 mm/s, ha determinado buenos resultados en general para todos los transductores considerados.
- ❖ De los dos métodos expuestos para el cálculo de áreas dañadas, el método mediante *ImageJ*, ha determinado resultados más exactos que el *método de los histogramas*. En cualquier caso, ambos métodos se consideran válidos, ya que han arrojado resultados semejantes, siendo el método de los histogramas el que ha determinado un porcentaje de área dañada algo mayor.

8.2 TRABAJOS FUTUROS

En esta sección se proponen algunas líneas de trabajo que permitirán ampliar lo realizado en este proyecto de investigación.

- ❖ Verificar si la velocidad óptima de inspección se mantiene para otros tipos de materiales tipo sándwich.
- ❖ Extender este trabajo a otros materiales compuestos, espumas metálicas y otros materiales, determinando velocidades óptimas de inspección para estos.
- ❖ Para el material considerado, determinar el máximo espesor que se puede inspeccionar.
- ❖ Cuando el laboratorio disponga de pares de transductores de la misma frecuencia y diferente diámetro, realizar el estudio del efecto del diámetro de los transductores.
- ❖ Comparar los resultados obtenidos en este proyecto, con otras técnicas de inspección no destructivas. En principio, el método que permite establecer comparaciones más críticas, parece ser el análisis termográfico.
- ❖ Establecer relaciones entre el porcentaje de área dañada y la energía de impacto de las probetas que han sido estudiadas en este proyecto.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

En el desarrollo del proyecto se han consultado libros, múltiples páginas web, y una gran variedad de *papers*, pero las referencias consideradas han sido las siguientes:

- [1] <http://www.ndt-ed.org>
- [2] <http://www.emeraldinsight.com>
- [3] Especificación técnica del equipo y transductores aportada por QMI (incluida en los anexos).
- [4] <http://www.qmi-inc.com/>
- [5] David K. Hsu, Daniel J. Barnard, John J. Peters, y Daniel L. Polis (2004). “Application of air-coupled ultrasound in nde of composite space structures”. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation Vol. 23.
- [6] Gómez Álvarez-Arenas, Tomás E.; Montero de Espinosa, Francisco R. Instituto de acústica del CSIC. “Piezoelectric transducers for air-coupled operation in the frequency range 0.3-2.5 MHz”.
- [7] E. Blomme, D. Bulcaen y F. Declercq (2002). “Air-coupled ultrasonic NDE: experiments in the frequency range 750 kHz – 2 MHz”. NDT & E International. Vol. 35. Págs. 417-426.
- [8] David K. Hsu (2006). “Nondestructive testing using air-borne ultrasound”. Ultrasonics. Vol. 44. e1019-e1024.
- [9] T. Mitrevski, I. H. Marshall y R. Thomson (2006). “The influence of impactor shape on the damage to composite laminates”. Composite Structures. Vol. 76. Págs.116-122.
- [10] Hasiotis T., Badogiannis E. y Tsouvalis N.G. (2007). “Application of Ultrasonic C-Scan Techniques for Tracing Defects in Laminated Composite Materials”. 4th Conference International on NDT.
- [11] Kisoo Kang, Manyong Choi, Koungsuk Kim, Yonghun Cha, Youngjune Kang, Dongpyo Hong, y Seongmo Yang. “Inspection of impact damage in honeycomb composite plate by espi, ultrasonic testing, and thermography”. 12th A-PCNDT 2006 - Asia-Pacific Conference on NDT.
- [12] Tomasz Lendze, Rafał Wojtyra, Laurent Guillaumat, Christine Biateau, Krystyna Imielińska. “Low velocity impact damage in glass/polyester composite sandwich panels”. ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE. Vol. 6, No. 1 (9), Junio de 2006.
- [13] Composite materials handbook. Vol. 2: Material properties. Departament of defense handbook. USA.



- [14] E. Žukauskas, V. Cicėnas, R. Kažys. “Application of air-coupled ultrasonic technique for sizing of delamination type defect in multilayered materials”. ISSN 1392-2114 ULTRAGARSAS, No.1 (54). 2005.

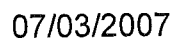
- [15] J. Buckley. Principles and Applications of Air-Coupled Ultrasonics. Sonatest.1997.

- [16] Brenda L. Buitrago Pérez. “Análisis y evaluación de estructuras sándwich sometidas a cargas impulsivas”. Febrero de 2009.

ANEXOS



SONDA 007CX AIRSCAN®



5442 Oceanus Drive, Huntington Beach, CA 92649 * Phone: 714.903.4500 * FAX: 714.903.4550

TABLE OF CONTENTS

PAGE

1. APPLICATIONS AND BASICS	4
2. PARTS LIST	5
2.1 STANDARD PACKAGE	5
2.2 OPTIONS	5
3. WARNINGS	6
4. INITIAL SET UP	6
4.1 ELECTRICAL CONNECTIONS	6
4.2 TRANSDUCER ALIGNMENT	7
4.2.1 Through Transmission - Compressional Wave	7
4.2.2 Through Transmission - Shear Wave	7
4.2.3 Guided Plate Waves - single side	7
4.2.4 Guided Plate Waves - two sides	7
5. FRONT PANEL	8
5.1 LAY-OUT AND INSTRUMENT SETTING	8
5.2 TRANSMITTER	9
5.3 RECEIVER	9
5.4 DISPLAY	10
5.5 GATE	11
5.6 ALARM	11
5.7 FILE	12
5.7.1 SAVE	12
5.7.2 CALL	12
6. BACK PANEL CONNECTIONS	14
6.01 LAYOUT	14
6.02 ALARM OUT	14
6.03 SYNC IN	14
6.04 SYNC OUT	14
6.05 ANALOG	14
6.06 RF	14

6.07 REMOTE (D-SUB 9, Male)	14
6.08 VIDEO (High Density D-SUB 15, female)	14
6.09 PULSER.....	14
6.10 IEC CONNECTOR/MAIN FUSE	15
7. OPERATING PROCEDURES	15
7.1. INITIAL TRANSDUCER ALIGNMENT AND SETTINGS.....	15
7.2 THROUGH-TRANSMISSION - COMPRESSIONAL WAVE.....	15
7.3 THROUGH-TRANSMISSION - SHEAR WAVE	15
7.4 GUIDED PLATE WAVES – ONE SIDE AND TWO SIDES	16
7.5 HONEYCOMB PANELS - STRAIGHT THROUGH-TRANSMISSION.....	17
7.6 HONEYCOMB PANELS - SPECIAL CONFIGURATIONS.....	17
7.7 GATE SETTING	18
7.7.1 Laminates (Through-Transmission)	18
7.7.2 Guided Plate Waves	18
7.7.3 Honeycomb	18
8. APPENDIX	19
8.1 INSTRUMENT RESET	19
8.2 EXTERNAL PROGRAMING	19

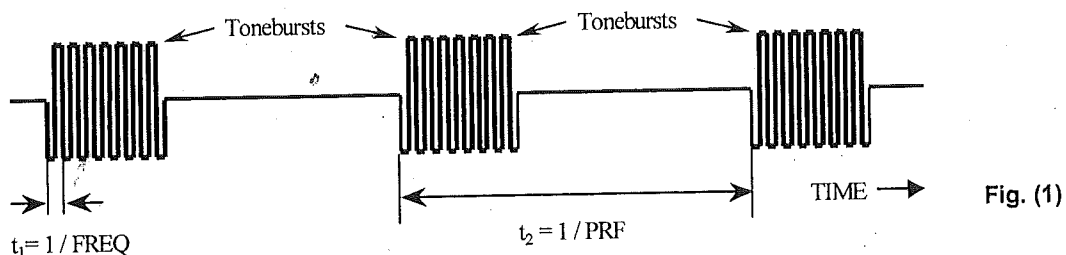
1. APPLICATIONS AND BASICS

The **SONDA 007CX** AIRSCAN is an air-coupled ultrasonic flaw detector. The ambient air is used as the sound-transmitting medium. The high reflection losses between the transducers and test object are accommodated by means of high power transducers and drivers, which include the generation of tonebursts (selectable at 50 kHz, 120kHz, 400kHz, and 1 MHz), and by narrowband, super low-noise and high-gain amplifiers. It is a single channel instrument, typically used in combination with a C-scan system. It is an upgraded version of the SONDA 007C, to which low frequency (50 kHz) capability has been added.

The **SONDA 007CX** AIRSCAN instrument is used wherever water couplant techniques are not compatible with industrial processes, and wherever water may damage or contaminate the material. The most common test materials include: Honeycombs, solar panels, foam sandwich panels, cork-coated honeycombs, carbon/carbon aircraft break discs, timber and wood products. More materials are under investigation.

The AIRSCAN transducers are typically used in through-transmission. Additionally, a single-sided pitch-catch configuration (in which plate waves can be used over long distances) may be employed.

The **SONDA 007CX** is built to generate a toneburst (Fig. 1), which is a pulse train or a sequence of pulses at the selected frequency. This feature provides the necessary power for the air-coupled technique.



Due to the high power of the tonebursts and the super low-noise, high-gain amplifiers, the SONDA 007CX AIRSCAN system is also very well suited to traditional ultrasonic methods, as with water squirters and roller probes, to test parts that have exceptionally high losses.

For additional information about air coupled ultrasonics see the following references:

- 1) W.A. Grandia and C.M. Fortunko: NDE Applications of Air-coupled Ultrasonics Transducers. 1995 IEEE Ultrasonic Symposium, Proceedings, Vol. 1, pp. 697-709, ISSN 1051-0117.
- 2) Hanspeter Loertscher, Bert Grandia, Jan Strycek, and Willem A. Grandia: AIRSCAN Transducers, Technique and Applications. Online Workshop on Transducers September 1996, UT-Online Journal, R. Diederichs, www.ndt.net/article/qmi/qmi.htm.
- 3) Jan O. Strycek, Willem A. Grandia, and Hanspeter Loertscher: Wave Modes Produced by Air Coupled Ultrasound. Online Workshop on Applications May 1997, UT-Online Journal, R. Diederichs, www.ndt.net/article/wsho0597/qmi2/qmi2.htm.

2. PARTS LIST

2.1 STANDARD PACKAGE

The Standard Package Consists Of

- SONDA-007CX AIRSCAN Instrument for 110/220 VAC
- Power supply cable
- Operating Manual
- Transit Case
- BB-6-174: Output Interface Cable, BNC-BNC, 6ft. long.*
- BU-12-58T/B: Triaxial Receiver Transducer Cable, BNC-UHF, 12ft. long, Color-Coded Blue*
- BU-12-58T/R: Triaxial Transmitter Transducer Cable, BNC-UHF, 12ft. long, Color-Coded Red*

* Alternative lengths available – may be an additional charge.

And includes your choice of any one pair of the following transducers:

- AS50Ai 50kHz Airscan Transducers
- AS120Ai 120kHz Airscan Transducers
- AS225Ai 225kHz Airscan Transducers
- AS4000Ai 400kHz Airscan Transducers
- ST-100 Mini Soft-Tip Probes

2.2 OPTIONS

The following options are available upon request

- Additional AS50Ai 50kHz Airscan Transducers
- Additional AS120Ai 120kHz Airscan Transducers
- Additional AS225Ai 225kHz Airscan Transducers
- Additional AS4000Ai 400kHz Airscan Transducers

3. WARNINGS

PLEASE READ THIS MANUAL

Before Attempting To Use Your Instrument

LEAVE THE POWER OFF

Before Making Cable Connections

4. INITIAL SET UP

4.1 ELECTRICAL CONNECTIONS

BEFORE TURNING THE INSTRUMENT ON, check all cable connections for tightness and make sure that the transducers are correctly connected (Receiver Transducer to RECV ONLY & Transmitter Transducer to XMIT). Failure to follow this procedure may damage the pulser circuit and/or the transducers, and void the warranty.

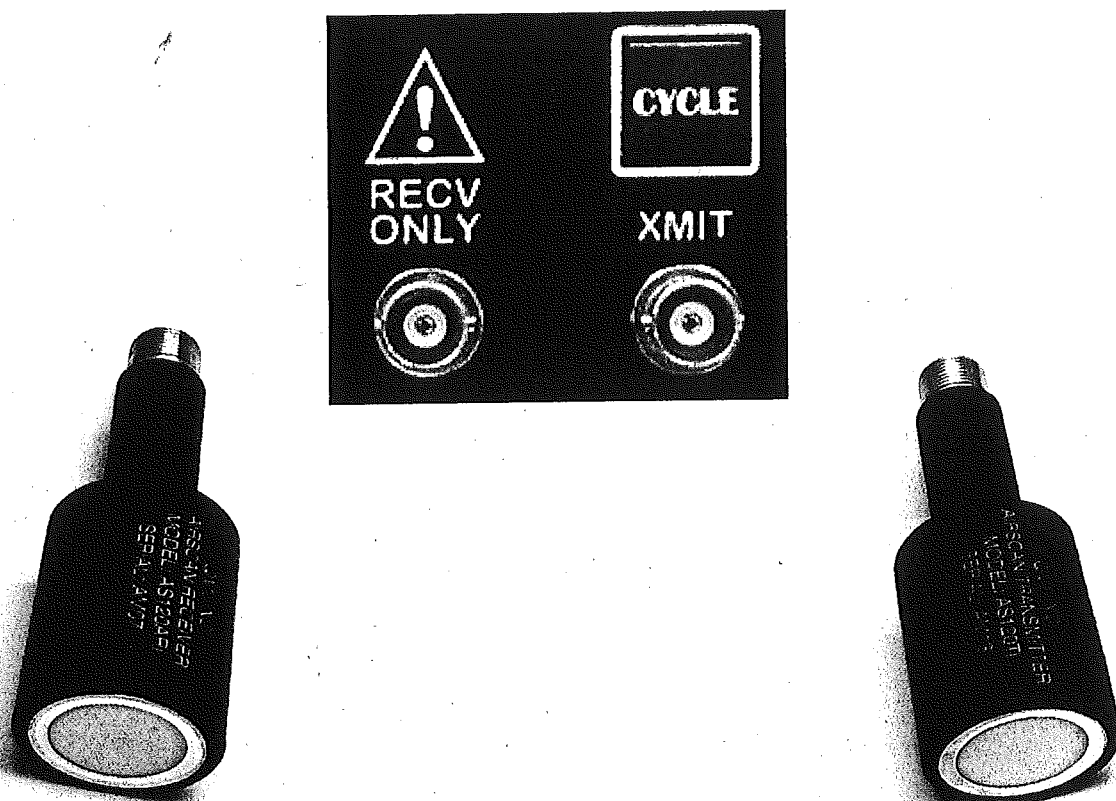


Fig. (1)

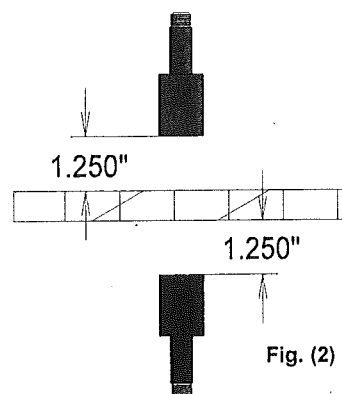
4.2 TRANSDUCER ALIGNMENT

The following instructions describe the initial set up for standard AS400Ai AIRSCAN transducers. The indicated values are approximate and limited to start-up settings only. First time users are advised to familiarize themselves first with the Through-Transmission - Compressional Wave set-up. The final procedure for precise tuning and aligning depends on the test part and the specific test procedure. See also chapter 7.

4.2.1 Through Transmission - Compressional Wave

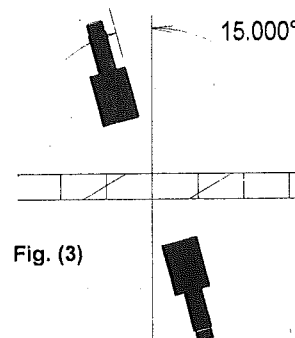
- Mount the transmitter at ~1.25" away from the part surface.
- Mount the receiver at ~ 1.25" away from the part surface.
- Align both transducers in-line with one another and perpendicular to the part surfaces.
- Optimize signal for peak amplitude of first arrival.

Note: Whenever the plate thickness equals half a wavelength, interference effects may occur, making it difficult to obtain a stable signal. The problem can be avoided by slightly tilting the transducers away from the surface normal.



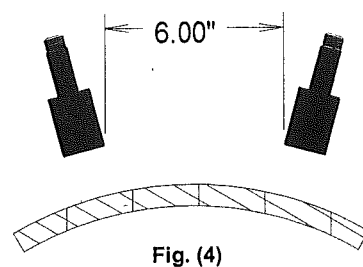
4.2.2 Through Transmission - Shear Wave

- Proceed as in 4.2.1
- Incline both transducers towards each other by ~ 15 degrees. Move transducers laterally, and optimize signal for peak amplitude of first arrival.



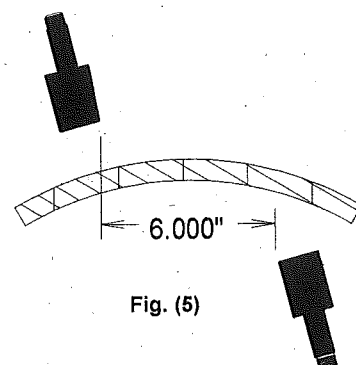
4.2.3 Guided Plate Waves – single side

- Mount transmitting transducer at ~ 1.25" from part surface, at an angle of ~ -15 degrees from the normal.
- Mount receiving transducer at ~ 6" away from the transmitting transducer, ~ 1.25" inch from the surface, and incline it by ~ +15 degrees from the normal, in direction towards the transmitting transducer. This will form a "V".
- Optimize signal for peak amplitude of first arrival.



4.2.4 Guided Plate Waves – two sides

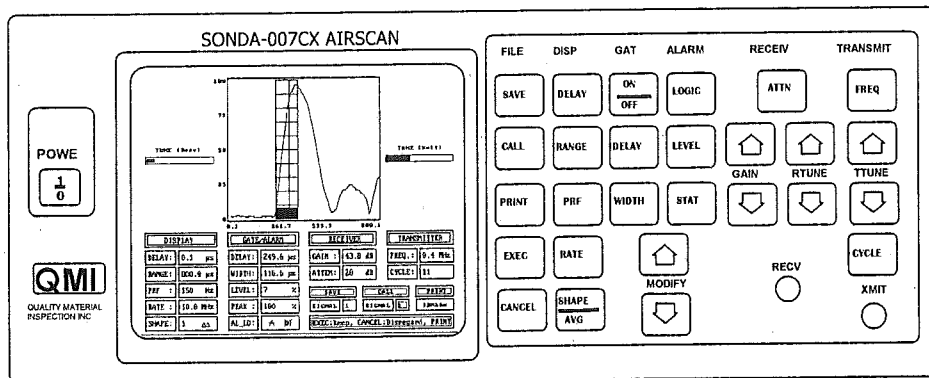
A Guided Plate Wave can be received from the side opposite to the transmitter. Distances and angles are approximately the same as in 4.2.3.



5. FRONT PANEL

5.1 LAY-OUT AND INSTRUMENT SETTING

Fig. (6)

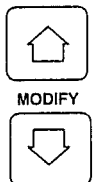


The **Front Panel** is divided into sections: the Video Display and the Function and Control Keys. The Video Display shows at the top the ultrasonic signal (A-Scan display) and at the bottom the instrument set-up field, with the values set by the function keys.

The **ON/OFF** button is located on the left of the Video Display, and in the lower right corner are the **connectors** for the transducer cables.

For **Instrument Reset** see Appendix.

The **Function and Control Keys** will be described in detail in the following paragraphs. They are grouped as follows: On the right side are the function and control keys for the RECEIVER and for the TRANSMITTER, and on the left side are the function keys for the FILE, DISPLAY, GATE and ALARM commands. The MODIFY keys for the setting and adjustment of the instrument parameters are located below.



Instrument Setting is performed by

- (1) Pressing the key of the function to be set. This activates the function and highlights the corresponding display in the instrument set-up field.
- (2) Using the MODIFY keys (Fig. 7) to adjust the specific value.

Note: TRANSMITTER and RECEIVER have dedicated adjustment keys.

Fig. (7)

5.2 TRANSMITTER

FREQ: Sets the toneburst frequency to 50kHz, 120kHz, 225kHz, or 400kHz, as well as the receiver filter. (225kHz will be optimal for most applications.)

Note: Transducers are specified for one frequency only.

CYCLE: Sets the number of pulses within one toneburst (see Fig.1), selectable from 1 to the maximum allowed for each transducer type. To select the repetition rate at which the tonebursts are generated, see: DISPLAY/PRF.

TUNE: These two keys control the fine-tuning (frequency up and down) of the selected frequency. Due to the narrow bandwidth of the transducers, precise tuning is essential for optimal system performance. The approximate tuning range of +/- 15% is indicated by a bar on the right side of the A-Scan Display (Fig. 6). This function is disabled for the 50 kHz frequency and not displayed.

TRANSMITTER	
FREQ. :	0.4 MHz
CYCLE:	14

Display Screen View
Fig. (8)

TRANSMI



TTUN



XMIT



Fig. (9)

5.3 RECEIVER

ATTN: The input stage of the receiver includes an attenuator network. The input signal can be attenuated by 0, 20, 40, or 60 dB to avoid possible saturation of the A-Scan.

GAIN: The gain of the receiver can be adjusted from 40 to 80 dB in increments of 0.2 dB. GAIN minus ATTN equals Variable Gain.

TUNE: These two keys control the fine-tuning (frequency up and down) of the receiver frequency. Due to the narrow bandwidth of the amplifiers, precise tuning is essential for optimal system performance. The approximate tuning range of +/- 15% is indicated by a bar on the left side of A-Scan Display (Fig. 6).

RECEIVER	
GAIN :	45.2 dB
ATTN:	0 dB

Display Screen View

Fig. (10)

RECEIVE



REC V
ONLY



Fig. (11)

5.4 DISPLAY

DELAY: Adjusts the delay between the trigger pulse (initiating the initial transmitter pulse, external or internal, see PRF), and the start of the A-scan. The delay can be varied from 0.1 to 1600 μ s in increments of 0.1 μ s.

RANGE: Adjusts the time range of the A-Scan Display from 0.4 to 800 μ s. At sampling rates \leq 5 MHz the maximum range is extended to 1600 μ s.

PRF: Sets the Pulse Repetition Rate, i.e. the rate at which the tonebursts are generated, to 150, 200, 300, and 500 Hz, or to external for C-scan system. In the EXT trigger mode, the display is frozen until a trigger pulse is detected on the TRIG IN BNC connector (see: "6. Back Panel Connections").
Note: PRF is limited to 200 Hz for a toneburst frequency below 400 kHz.

RATE: Sets the sampling rate of the digitizer from 1.2 to 10 MHz in 4 steps.
Note: This value should be set to 10 MHz for most applications.

SHAPE: Four different shapes are available for the A-Scan Display:

- **RF mode**, displaying positive and negative signals around the baseline placed in the center of the display, in the "filled" or "hollow" mode (Fig. 14 & 15):

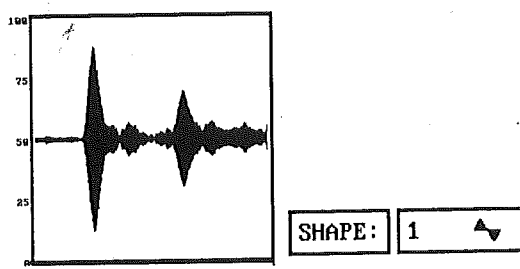


Fig. 14

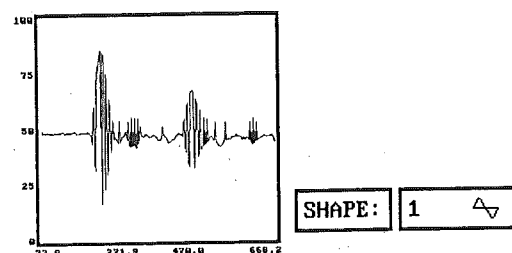


Fig. 15

- **FW (full-wave) mode**, rectifying the A-scan and displaying it above the baseline placed at the bottom of the display, in the "filled" or "hollow" mode (Fig. 16 & 17):

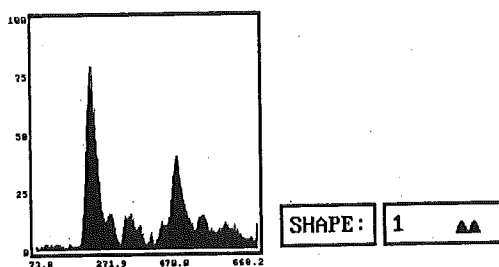


Fig. 16

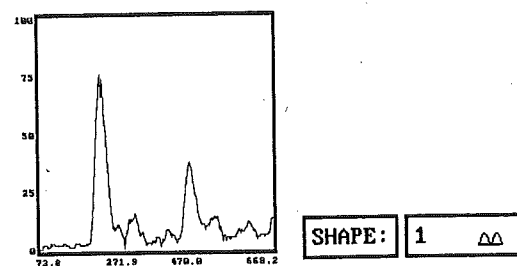


Fig. 17

AVG.: Pressing the SHAPE key and holding it for 3 seconds changes the function to AVG. The displayed signal is the average of a number "n" of A-scans. "n" is adjustable from 1 to 15. Pressing the AVG key switches this function back to SHAPE.

DISPLAY	
ELAY:	115.8 μ s
RANGE:	262.1 μ s
RF :	150 Hz
ATE :	10.0 MHz
SHAPE:	1 $\Delta\Delta$

Display Screen View

Figure (12)

DIS

DELAY

RANG

PR

RAT

SHAP

AV

Figure (13)

5.5 GATE

ON/OFF: Turns the gate on or off. If ON, the gate (width and height) is shown in the A-Scan Display.

DELAY: Controls the starting position of the gate in the A-Scan Display. The delay time starts with the trigger pulse (initial pulse) and is adjustable from 0.1 - 1600 μ s.

WIDTH: Adjusts the width of the gate from 0.1 to 800 μ s in increments of 0.1 μ s.

LEVEL: Adjusts the height of the gate from 0 to 100% of the screen height.

GATE/ALARM	
DELAY:	198.1 μ s
WIDTH:	26.7 μ s
LEVEL:	7 %
PEAK:	10
AL_LO:	A »»

Display Screen View

Fig. (18)

GAT



Fig. (19)

5.6 ALARM

LOGIC: Sets the logic to generate an audible alarm for peak amplitude within the gate that either exceeds the level of the gate height (A), or falls below (A) said level. An appropriate icon is displayed.

LEVEL: Has the same function as under GATE.

STATUS: Sets the alarm to OFF, NORMAL, or LATCHED.

»» : In the OFF setting, the alarm is disabled.

::: : In the NORMAL status, an alarm tone is generated which lasts as long as the alarm condition lasts.

== : In the LATCHED status, the tone is generated continuously; even after the alarm condition has been removed. Setting the status to OFF resets an ongoing alarm.

GATE/ALARM	
LOGIC:	19
WIDTH:	26
LEVEL:	7
PEAK:	10
AL_LO:	A »»

LO= Logic

AL_ST:	A :::
--------	-------

ST= Status

Display Screen View

Fig. (20)

ALAR



Fig. (21)

5.7 FILE

NOTE: The executed actions of EXEC and INC/DEC vary. The current actions are displayed in the message line beneath the SAVE/CALL/PRINT line and will be described in the following.

5.7.1 SAVE

This function allows saving either the displayed "on-line" A-scan signal, together with the instrument settings, or the instrument settings alone.

MODIFY ($\sigma\tau$): Toggles between "signal" and "set up".

EXEC: Once above selection is made, pressing EXEC the first time will freeze the screen (if "signal" was selected) and activate the next field of entry, where the file number can be set from 1 to 20 (using INC/DEC).

EXEC: Pressing EXEC a second time completes the savings process and re-activates the A-Scan Display, in case "signal" option was selected.

CANCL: Pressing CANCL instead of EXEC the second time will return to the initial SAVE function.

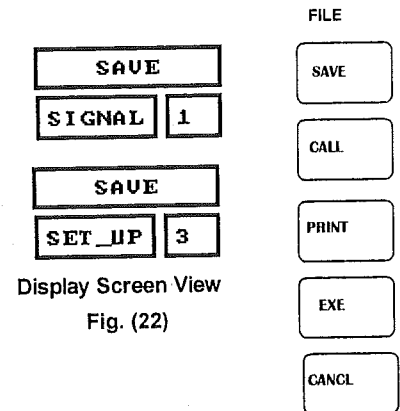


Fig. (23)

EXEC : Proceed, INC/DEC : Select

Display Screen View

EXEC : Save, INC/DEC : Select

Display Screen View

5.7.2 CALL

This function allows recalling a previously saved A-scan together with the instrument settings, or an instrument setting only.

MODIFY ($\sigma\tau$): Toggles between "signal" and "set up".

EXEC: Once above selection is made, pressing EXEC the first time will activate the next field of entry, where the file number can be selected from 1 to 20 (using MODIFY).

EXEC: Pressing EXEC a second time completes the recall process and displays the (frozen) A-scan signal and instrument settings from the file in case the "signal" option was selected. In case the "set up" option was selected, the on-line A-scan signal is displayed with the recalled settings.

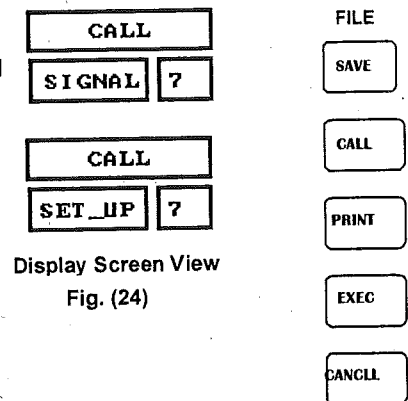


Fig. (25)

EXEC : Proceed, INC/DEC : Select

Display Screen View

EXEC : Call, INC/DEC : Select

Display Screen View

CANCEL: Reactivates first entry field for signal/setup selection.

If "signal" call was selected, the three following options become available:

EXEC: Pressing EXEC a third time will keep the recalled instrument settings and re-activate the A-Scan Display.

EXEC:Keep, CANCEL:Disregard, PRINT

Display Screen View

CANCEL: Disregards the recalled settings and returns to the on-line settings with the active A-Scan Display.

PRINT: This Function is no longer available.

Note: When a re-called A-scan is displayed, one of above options (EXEC, CANCEL, PRINT) has to be selected before any other key can be used.

6. BACK PANEL CONNECTIONS

6.01 LAYOUT

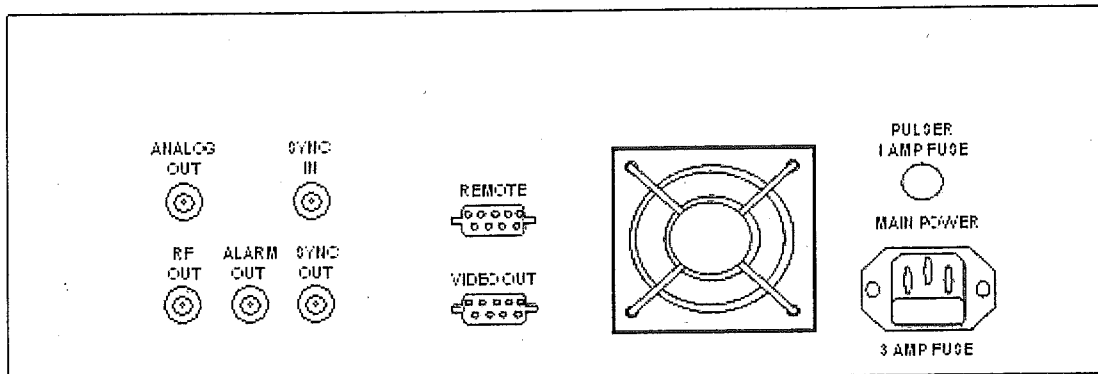


Fig. (27)

6.02 ALARM OUT

TTL Alarm Output (25mA Max: **NOT** for directly driving relays, external lamps, etc.)

6.03 SYNC IN

TTL Trigger Input

6.04 SYNC OUT

TTL Trigger Output

6.05 ANALOG OUT

Analog voltage Output, 0-5VDC, 40ma

6.06 RF OUT

RF voltage Output, 1V P-P, 40ma

6.07 REMOTE (RS232, D-SUB 9, Male)

This connector is utilized to transfer data (sending and receiving setup/signal information) between the SONDA instrument and an external computer. It provides a serial interface with RS-232 protocol. For further detailed information see APPENDIX.

6.08 VIDEO (High Density D-SUB 15, female)

A VGA monitor can be connected for simultaneous display of the SONDA Video Display.

6.09 PULSER

Pulser Fuse: fast-blow GMA-1A (250V).

6.10 IEC CONNECTOR/MAIN FUSE

AC Power is provided through this connector.
Main Fuse: fast-blow GMA-3A (250V).

7. OPERATING PROCEDURES

7.1. INITIAL TRANSDUCER ALIGNMENT AND SETTINGS

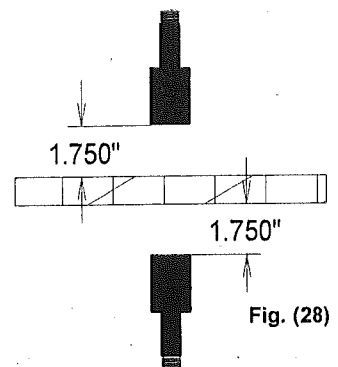
Transducer set-up and connections have to be performed according to chapter 4 as a pre-requisite for all the following configurations and applications.

Use the following instrument settings as base line:

DISPLAY/DELAY:	0.1 μ s
DISPLAY/RANGE:	400 μ s Minimum
RECEIVER/ATTN:	20 dB
RECEIVER/GAIN:	Set GAIN such that the signal peak is at 80% of full screen height
TRANSM/FREQ:	Set in accordance with transducer frequency
TRANSM/CYCL:	15 for 400kHz Transducers, 7 for 225kHz Transducers, 5 for 120kHz Transducers
GATE:	For the gate setting, see paragraph 7.8. The gate position must be set prior to initiating a C-scan.

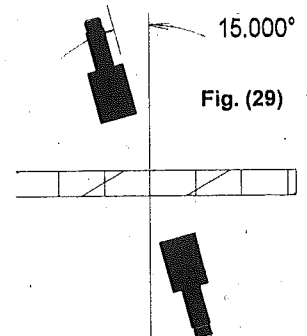
7.2 THROUGH-TRANSMISSION - COMPRESSIONAL WAVE

- (1) Position Plexiglas Standard (or $\sim 1/8"$ thick composite plate) between the transducers, transmitter and receiver set $\sim 1.25"$ from each surface; adjust transducers to be aligned co-axially and perpendicular to the plate.
- (2) Tune transmitter and receiver alternately to obtain maximum signal amplitude, and adjust gain (including ATTN) for 80% of full screen height.
- (3) Realign transducers alternately to obtain maximum signal amplitude.
- (4) Repeat (2) and (3) until maximum signal amplitude is obtained.
- (5) Replace Standard with test part, re-adjust standoff distances of transducers and go to (4).



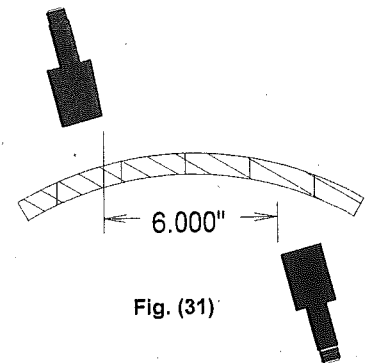
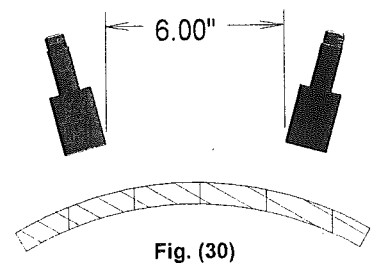
7.3 THROUGH-TRANSMISSION - SHEAR WAVE

- (1) Position Plexiglas Standard (or $\sim 1/8"$ thick composite plate) between the transducers, transmitter and receiver set $\sim 1.25"$ from each surface. Adjust the transducers so that they are separated laterally by $\sim 1/4"$, and incline both transducers towards each other, offset from the normal by ~ 15 degrees.
- (2) Tune transmitter and receiver alternatively to obtain maximum signal amplitude and adjust gain (including ATTN) for 80% of full screen height.
- (3) Realign transducers alternately to obtain maximum signal amplitude.
- (4) Repeat (2) and (3) until maximum signal amplitude is obtained.
- (5) Replace Standard with test part, re-adjust standoff distances of transducers and go to (4).



7.4 GUIDED PLATE WAVES – ONE SIDE AND TWO SIDES

- (1) Position Plexiglas Standard (or $\sim 1/8$ " thick composite plate) in front of the transducers, at ~ 1.25 " from surface. Adjust the transducers so that they are separated laterally by ~ 6 ", and incline them towards each other, offset from the normal by ~ 15 degrees.
- (2) Tune transmitter and receiver alternately to obtain maximum signal amplitude, and adjust gain (including ATTN) for 80% of full screen height. Look for the first signal prior to the direct leak signal (for one sided set up: transmitter to receiver through air, reflected by part surface).
- (3) Re-align transducers alternately to obtain maximum signal amplitude.
- (4) Repeat (2) and (3) until maximum signal amplitude is obtained.
- (5) Replace Standard with test part, re-adjust distances of transducers and go to (4).



7.5 HONEYCOMB PANELS - STRAIGHT THROUGH-TRANSMISSION

- (1) Position Plexiglas Standard (or $\sim 1/8"$ thick composite plate) between the transducers, transmitter and receiver set $\sim 1.25"$ from each surface; adjust transducers to be aligned co-axially and perpendicular to the plate.
- (2) Tune transmitter and receiver alternatively to obtain maximum signal amplitude and adjust gain (including ATTN) for 80% of full screen height.
- (3) Realign transducers alternately to obtain maximum signal amplitude.
- (4) Repeat (2) and (3) until maximum signal amplitude is obtained.
- (5) Replace Standard with honeycomb panel, re-adjust standoff distances of transducers.
- (6) Move panel (or transducer pair) to obtain maximum signal amplitude.
- (7) Repeat (2) and (3) until maximum signal amplitude is obtained.
- (8) Set gate according to par. 7.8.3, run a test-scan and look for the patterned graphic display of all cell walls. Systematically missing cell walls are indicative of slightly misaligned transducers. In this case, repeat (6) to (8). Best imaging *may* be obtained with transducers offset slightly from co-axial alignment.
- (9) Put a coin (metal plate of ~ 20 mm dia) on top of the test part and run test scan. A clearly imaged coin indicates both proper alignment and gate setting.

7.6 HONEYCOMB PANELS - SPECIAL CONFIGURATIONS

The Shear Wave configuration (par. 7.5) as used for laminates can also be applied to honeycomb structures.

Alignment procedure is the same as for laminates, followed by (6) through (8) of par. 7.6 for honeycombs.

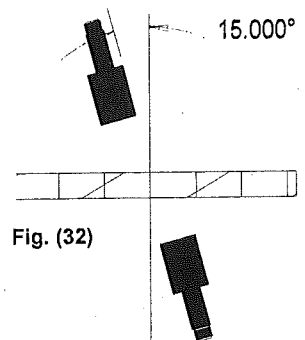


Fig. (32)

Good results may occasionally been obtained with the transducers inclined by as much as 45 degrees, and in both configurations shown (Fig. 33 and 34).

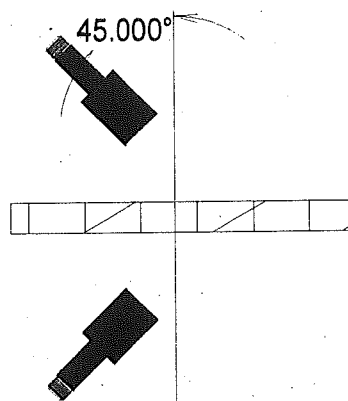


Fig. (33)

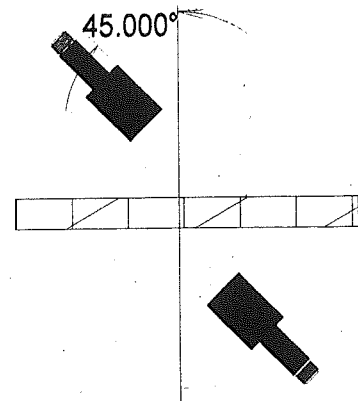


Fig. (34)

It is further possible to test the face sheet of a honeycomb structure by using the Guided Plate Wave set up (par. 7.5). The procedure is the same as for the Guided Plate Wave set up.

7.7 GATE SETTING

7.7.1 Laminates (Through-Transmission)

Set the gate to include the peak amplitude of the first group of signals (Fig. 35).

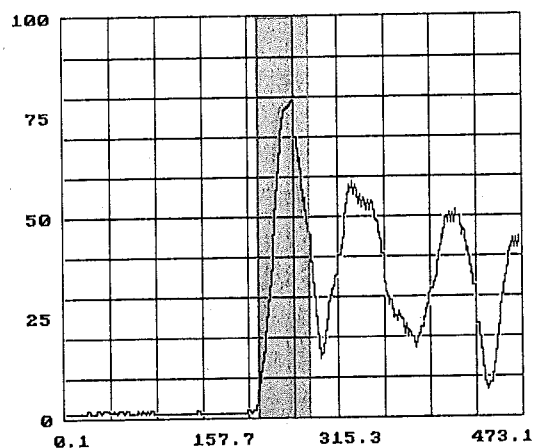


Fig (35)

7.7.2 Guided Plate Waves

Set the gate to include the peak amplitude of the first group of signals arriving prior to the signals from direct leakage (Fig. 36).

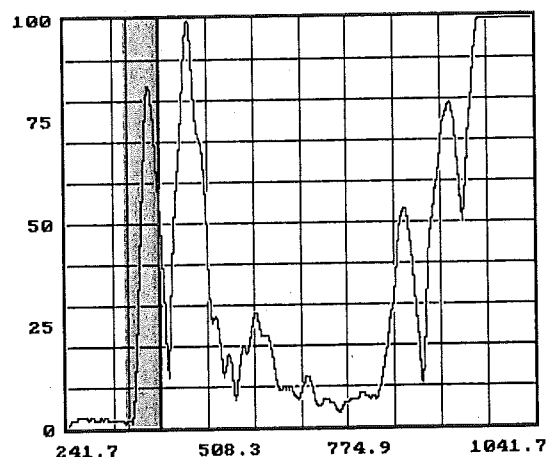


Fig (36)

7.7.3 Honeycomb

Set the narrow gate on the slope before reaching the peak amplitude (Fig. 37). Optimal position and width has to be experimentally obtained by running test scans. Select the parameters that yield the highest contrast.

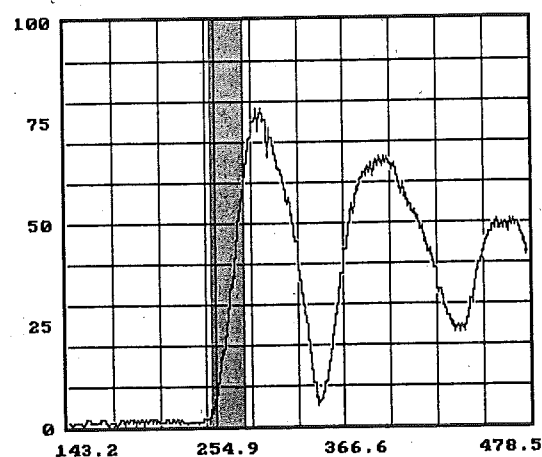


Fig (37)

TTUNE: 49%
RTUNE: 33% 4 120 KHz

8. APPENDIX

8.1 INSTRUMENT RESET

The button on the far left of the front panel marked as **Power 1/0** is used to turn the instrument **On** and **Off**. It is a push button switch and works in the toggle mode. Every time the instrument is turned off, the last settings are saved in the memory.



Fig. (38)

In case that the memory became corrupted for any reason and the instrument cannot be operated properly, or in case that the user wants to load the default settings, the instrument can be reset to the default values as follows:

- (1) Turn off the power, if the power is on.
- (2) Turn the power on.
- (3) Wait until the three short beep sound comes on.
- (4) As soon as the first beep sound is heard, **PUSH** and **HOLD** any key on the front panel until the signal is displayed. This action will automatically load the default settings.
- (5) Release the key.

8.2 EXTERNAL PROGRAMING

The Back Panel Connector "REMOTE" RS-232 (D-SUB Male, see Fig. 27) is utilized to transfer data (sending and receiving setup/signal information) between the SONDA instrument and an external computer. It provides a serial interface with RS-232 protocol.

Sonda setup parameters can be set or acquired over serial communication. The RS-232 interface provides another means of setup control in addition to front panel control. In cases where front panel cannot be reached, this communication should be used to change the instrument setup. Basic 3-wire null modem configuration is used on the interface cable (Part #: RS232-NULL).

The communication program should be set as an ASCII terminal. Communication parameters should be selected as 9600 Baud, None Parity, 8 Data Bits, and 1 Stop Bit. The command format is defined as follows:

<Command><Space><Value><Enter>

<Command>: This is a two-letter (not case-sensitive) function abbreviation. Commands are usually the initials of the related function. (Such as DD is used for Display Delay). All available commands are provided in the command list below.

<Space>: Optional ASCII space character (20 in Hexadecimal).

<Value>: Optional command value in decimal format. All possible values for each command are provided in the command list below (Table 2).

<Enter>: ASCII 'Carriage Return' character (D in Hexadecimal).

Commands are used either to inquire or to change the setup value. To inquire the value of a function, <Command><Enter> sequence is used. The current value of the specified function is returned as appended to the end of the command. To change the function value on Sonda, command abbreviation followed by the new value, i.e. <Command><Space><Value><Enter> should be sent. Samples of commands for both of these operations are given below in Table 1:

TABLE 1

Command Sent	Description	Answer from Sonda	Description
DD<Enter>	Inquire Display Delay	DD<Space>1000	Digitizer delay = 100 μ sec.
XX<Enter>	Inquire non-valid Command	?	Not a valid command
GW<Space>4000<Enter>	Set Gate Width to 400 μ sec.	GW<Space>4000	Gate Delay = 400 μ sec.
AL<Space>1000<Enter>	Set Alarm Level to 1000	?	Not a valid entry

All available commands for serial communication are listed in the following table 2:

TABLE 2

COMMAND	DESCRIPTION	RANGE	ACTUAL VALUE
DD	Display Delay	1 - 16000	0.1 μ sec. - 1600 μ sec.
DW	Display Width	4 - 8000	0.4 μ sec. - 800 μ sec. (0.4 - 1600 μ sec at SR \leq 5 MHz)
RF	PRF	0 - 3	0: EXT, 1: 150 Hz., 2: 200 Hz., 3: 300 Hz., 4: 500 Hz.
SR	Sampling Rate	0 - 3	0: 1.2 MHz., 1: 2.5 MHz., 2: 5 MHz., 3: 10 MHz.
SH	Signal Shape	0 - 3	0: RF Hollow, 1: RF Filled, 2: FW Filled, 3: FW Hollow
GD	Gate Delay	1 - 16000	0.1 μ sec. - 1600 μ sec.
GW	Gate Width	1 - 8000	0.1 μ sec. - 800 μ sec.
GT	Gate Threshold	1 - 127	%100 - %0
TF	Xmit. Freq.	0 - 3	0: 0.05 MHz., 1: 0.12 MHz., 2: 0.225 MHz, 3: 0.400 MHz
TC	Xmit. Cycle	1 - 15	1 - 15
RG	Recv. Gain	1 - 255	40.0 dB - 80 dB
RA	Recv. Attn.	0 - 3	0: 0 dB, 1: 20 dB, 2: 40 dB, 3: 60 dB
AS	Alarm Status	0 - 2	0: Continuous, 1: Intermittent, 2: Alarm Off
AL	Alarm Logic	0 - 1	0: Above Threshold, 1: Below Threshold
AV	Averaging	1 - 15	1 - 15
TT	Xmit. Tune	0 - 255	-100 kHz. - +20%. around Xmit. Freq.
RT	Recv. Tune	0 - 255	-100 kHz. - +20%. around Xmit. Freq.



QMIFN-1104 Transducer Characterization

Certification Data

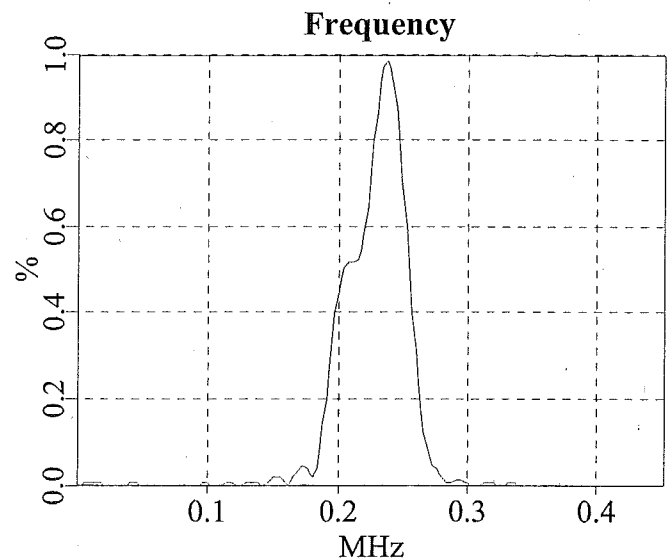
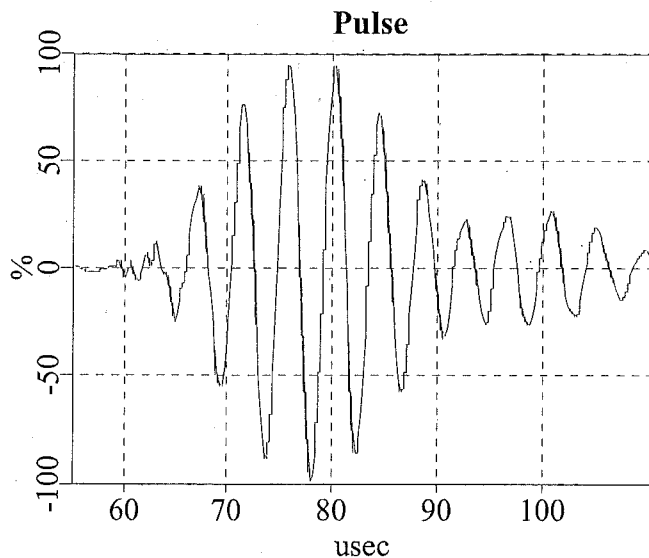
Cert. Number: 0812005
Cert Date: 12/12/2008
Cert. Validity: One Year
Customer: Sonatest PLC
P.O. Number: 6465
TRANSDUCER DATA:
Manufacturer: QMI
Model Number: AS225Ti
Serial Number: AS16
Transducer Type: Airscan Transmitter
Frequency: 225kHz

Inspection Instrumentation

Pulser: Panametrics 5800
Pulser S/N: 95041812
NIST Report.: #26298
Data Acq.: QMI MC-DAQ
Data Acq. S/N: 0612001
NIST Report.: #1529
Scanner Model: UPK IIB
Scanner S/N: 1600204611
NIST Report.: #1502A
Reference TX: AN38
NIST Report.: 0801012
Cable: 6ft. 50ohm

Pulser/Receiver Settings

Damping: 500ohm
Energy: 100uJ
Gain (dB): 40
Attenuation (dB): 15.8
H. P. filter: 1kHz
L. P. filter: 5MHz
Sensitivity (-dB): 70.1



Pulse Results

Pulse Width @ -6dB: 14.794 usec
Pulse Width @ -20dB: 44.258 usec
Peak to Peak Amplitude: 195.703 %

Frequency Results

Peak Frequency: 0.239 MHz
Center Frequency: 0.229 MHz
Low Frequency @ -3dB: 0.224 MHz
High Frequency @ -3dB: 0.249 MHz
Bandwidth @ -3dB: 10.733 %
Low Frequency @ -6dB: 0.204 MHz
High Frequency @ -6dB: 0.254 MHz
Bandwidth @ -6dB: 22.098 %

Documented by:

Measurements per ASTM E-1065-99 with instruments traceable to NIST in accordance with MIL-STD-45662A.



QMIFN-1104 Transducer Characterization

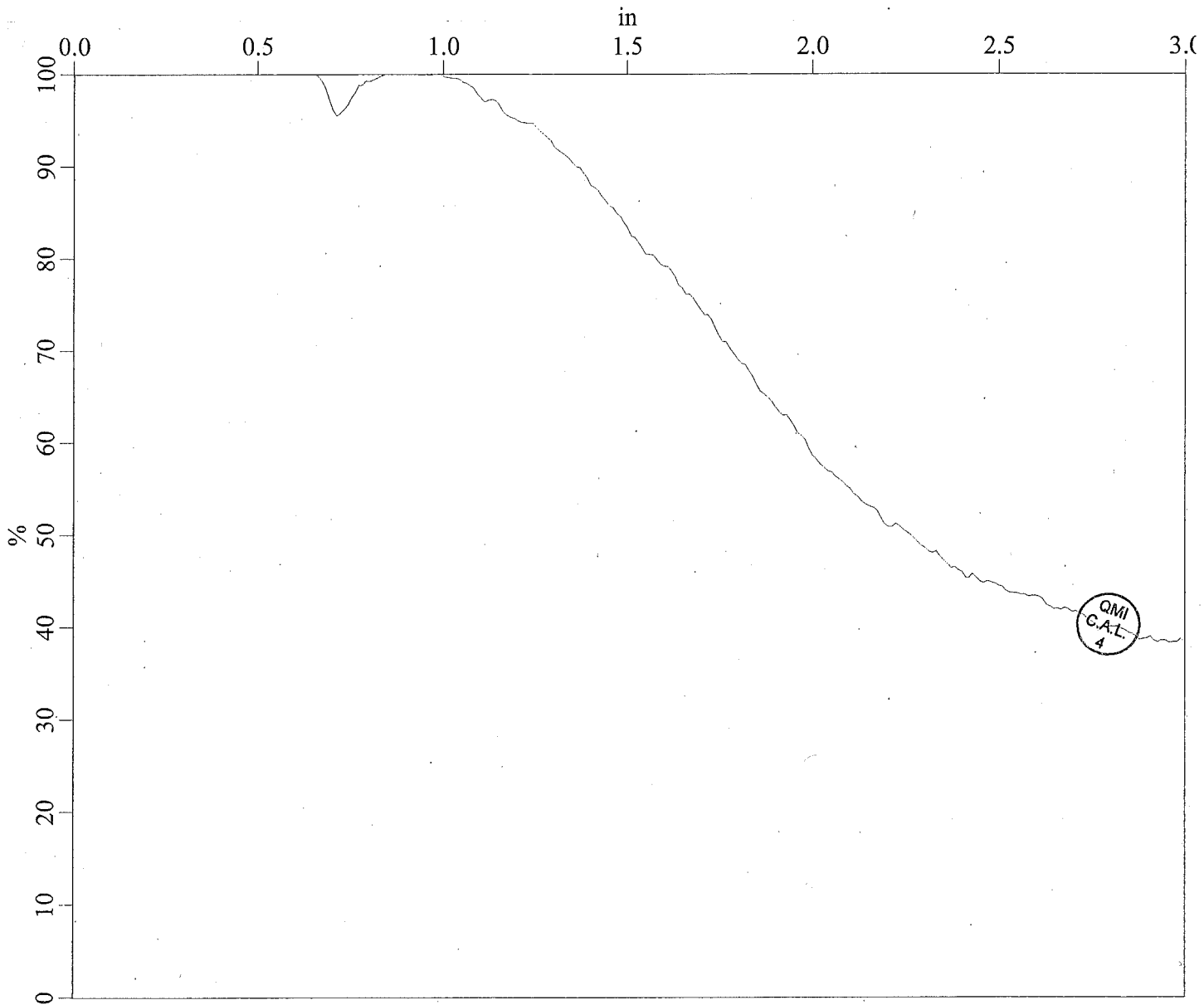
Filename: AS16 D-A (subset 1)
Date: 12/12/08 16:22:32

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 3.000
Resolution: 0.010 (300 points)

VERTICAL AXIS (%)

Start: 0.000
Length: 100.000
Resolution: 0.024 (4096 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

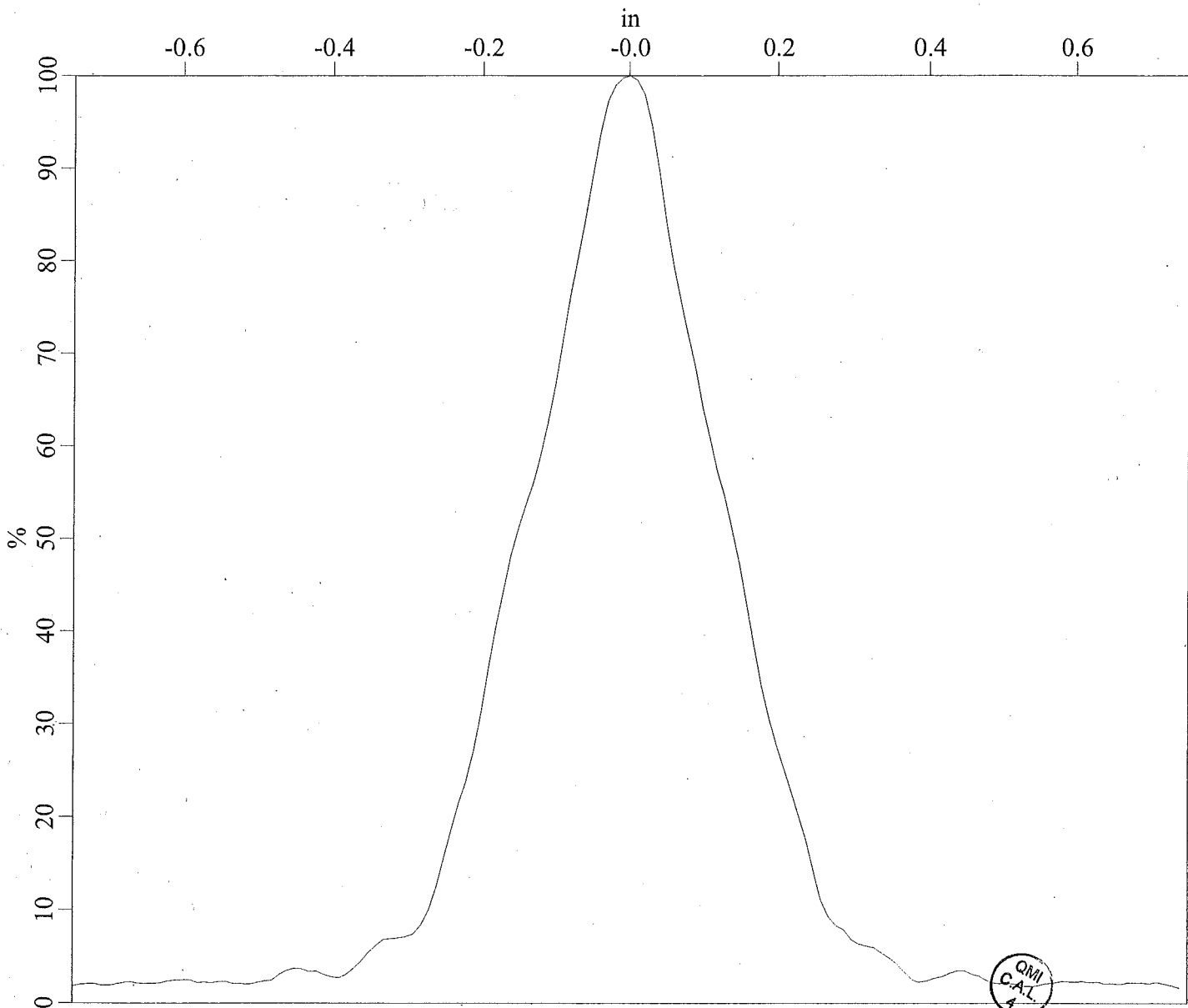
Filename: AS16 DIA (subset 1)
Date: 12/12/08 16:24:02

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (%)

Start: 0.000
Length: 100.000
Resolution: 0.024 (4096 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

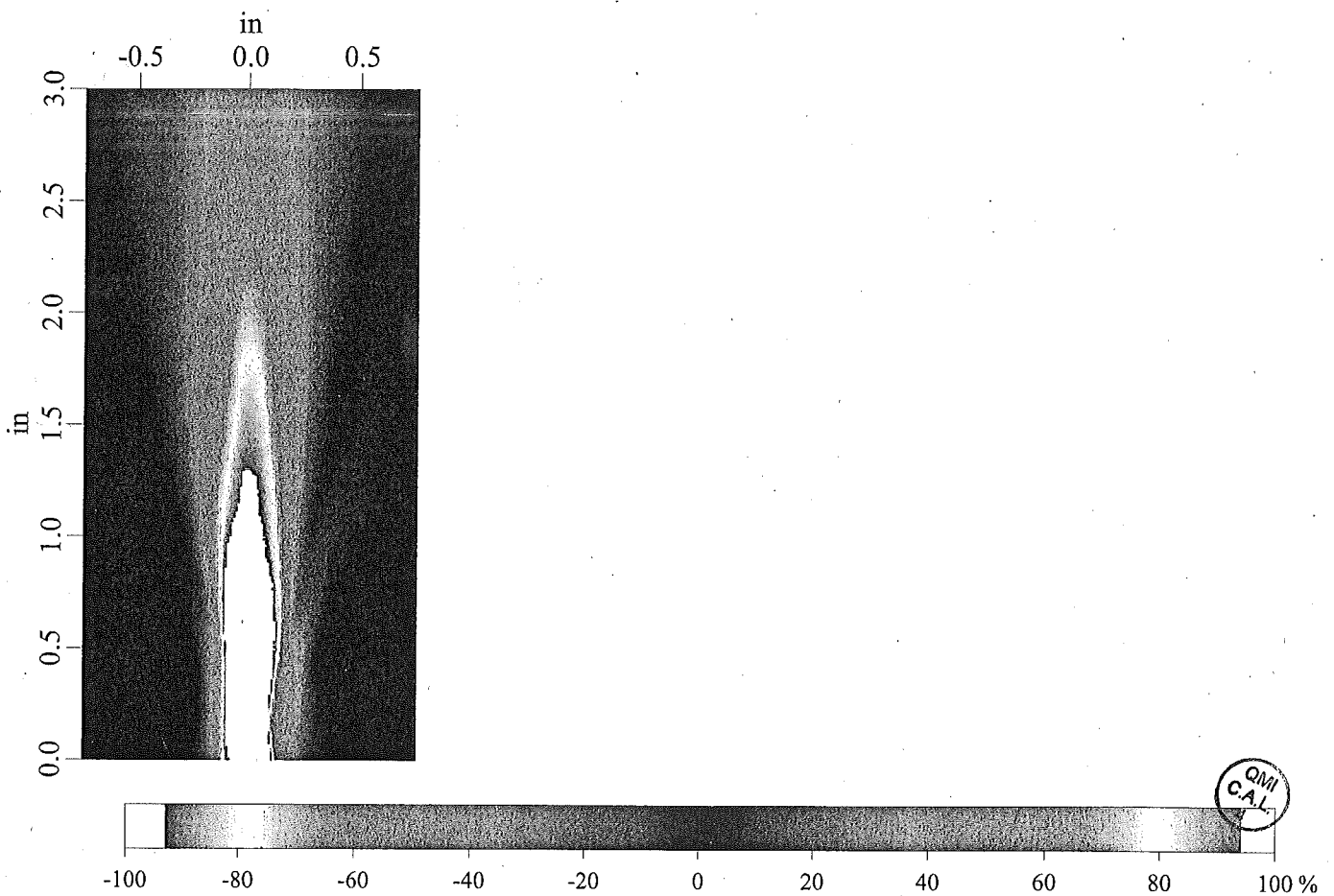
Filename: AS16 Transverse X Cscan (subset 1)
Date: 12/12/08 16:37:26

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 3.000
Resolution: 0.010 (300 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

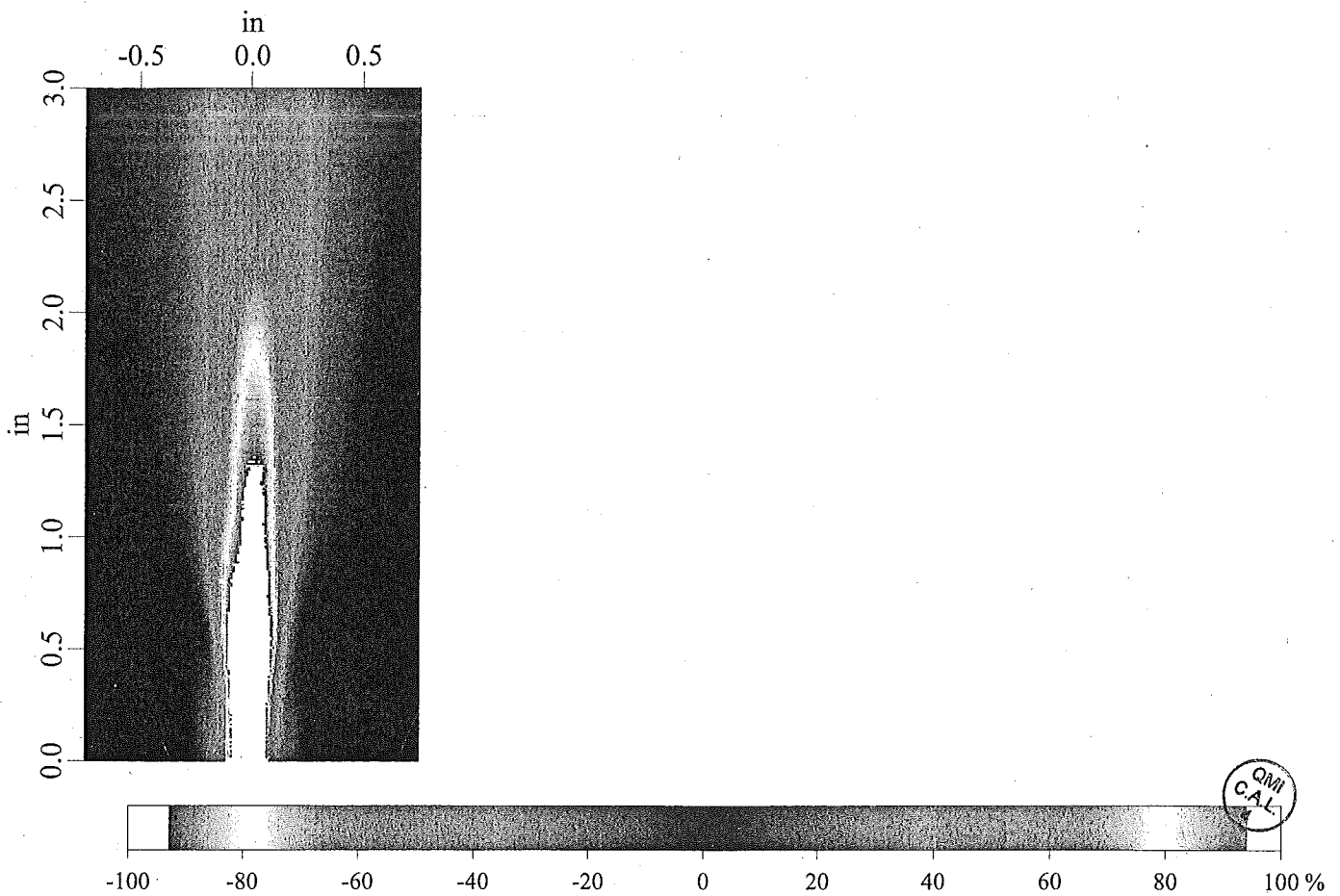
Filename: AS16 Transverse Y Cscan (subset 1)
Date: 12/12/08 16:53:20

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 3.000
Resolution: 0.010 (300 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



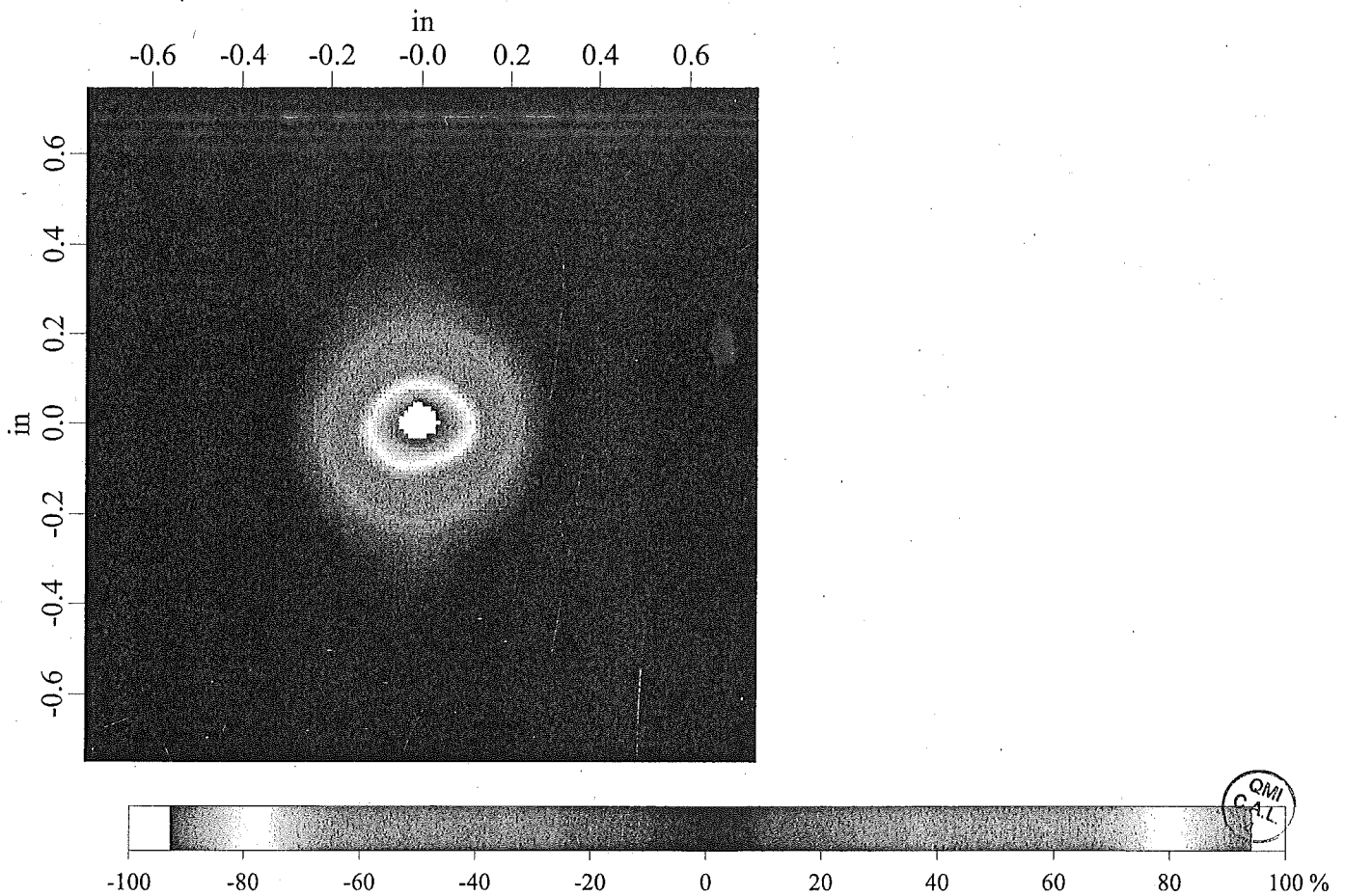
Filename: AS16 Beam Spot Cscan (subset 1)
Date: 12/12/08 17:00:52

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

Certification Data

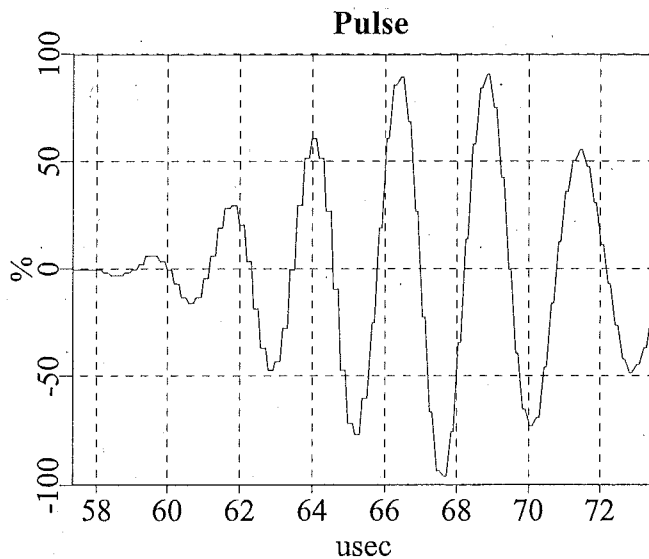
Cert. Number: 0812008
Cert Date: 12/15/2008
Cert. Validity: One Year
Customer: Sonatest PLC
P.O. Number: 6465
TRANSducer DATA:
Manufacturer: QMI
Model Number: AS400Ti
Serial Number: AS41
Transducer Type: Airscan Transmitter
Frequency: 400kHz

Inspection Instrumentation

Pulser: Panametrics 5800
Pulser S/N: 95041812
NIST Report: #26298
Data Acq.: QMI MC-DAQ
Data Acq. S/N: 0612001
NIST Report: #1529
Scanner Model: UPK IIB
Scanner S/N: 1600204611
NIST Report: #1502A
Reference TX: AN54
NIST Report: 0801013
Cable: 6ft. 50ohm

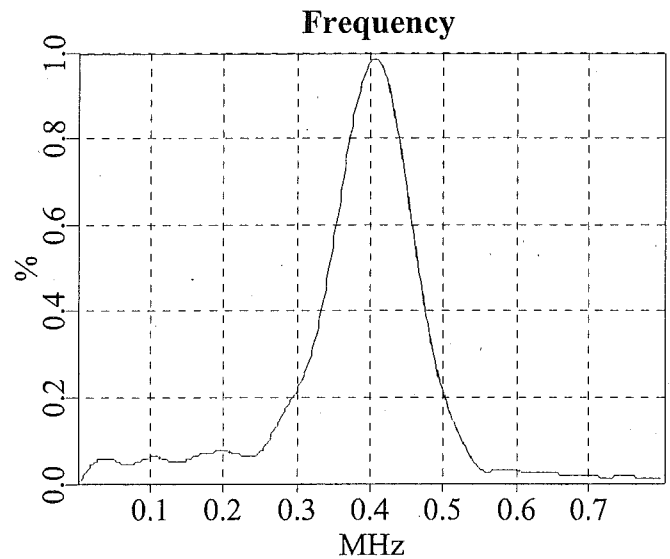
Pulser/Receiver Settings

Damping: 500ohm
Energy: 12.5uJ
Gain (dB): 40
Attenuation (dB): 5
H. P. filter: 1kHz
L. P. filter: 5MHz
Sensitivity (-dB): 80.9



Pulse Results

Pulse Width @ -6dB: 7.357 usec
Pulse Width @ -20dB:
Peak to Peak Amplitude: 188.477 %



Frequency Results

Peak Frequency: 0.409 MHz
Center Frequency: 0.405 MHz
Low Frequency @ -3dB: 0.363 MHz
High Frequency @ -3dB: 0.449 MHz
Bandwidth @ -3dB: 21.329 %
Low Frequency @ -6dB: 0.344 MHz
High Frequency @ -6dB: 0.467 MHz
Bandwidth @ -6dB: 30.356 %

Documented by:

Measurements per ASTM E-1065-99 with instruments traceable to NIST in accordance with MIL-STD-45662A.



QMIFN-1104 Transducer Characterization

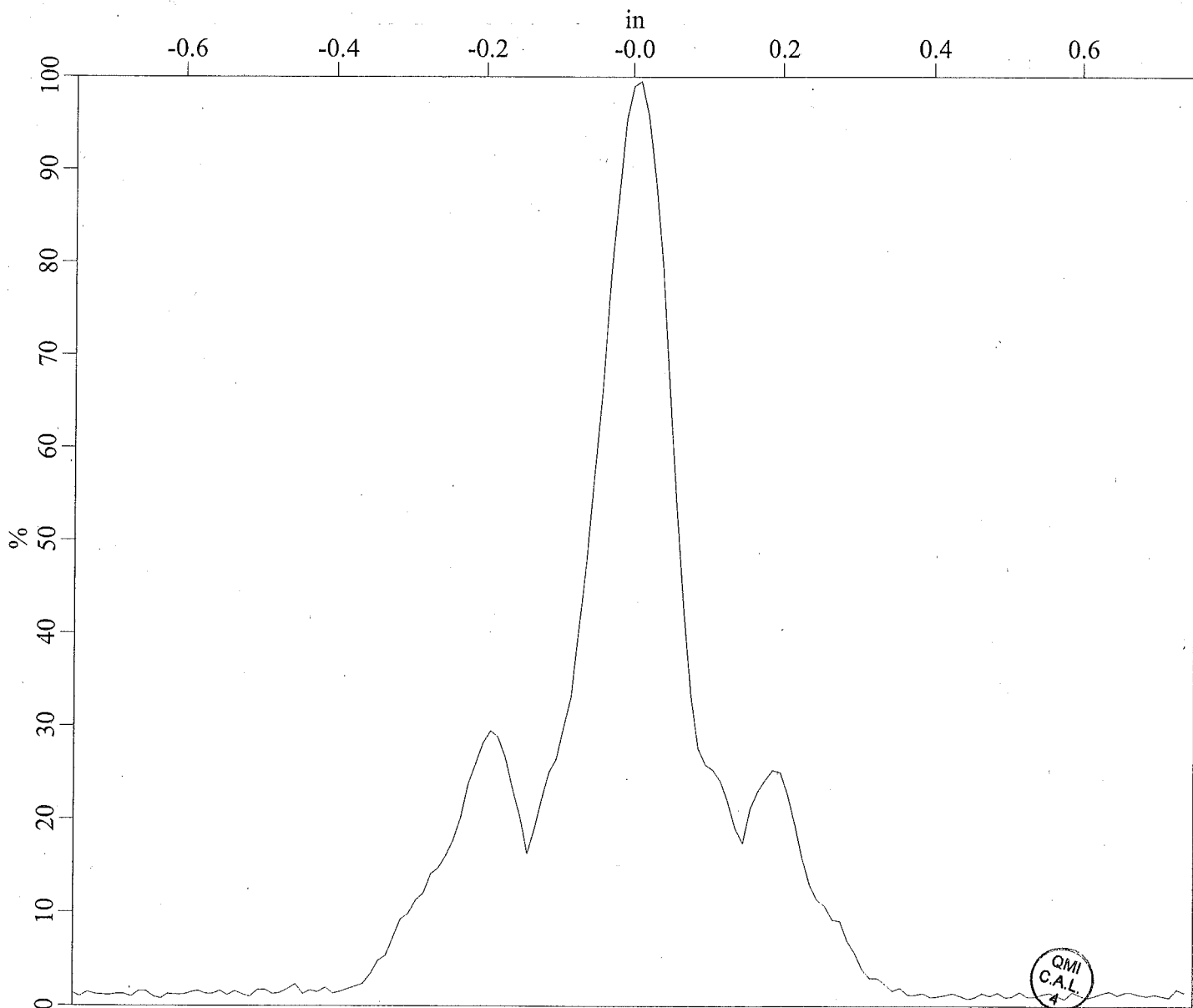
Filename: AS41 DIA (subset 1)
Date: 12/15/08 13:41:24

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (%)

Start: 0.000
Length: 100.000
Resolution: 0.024 (4096 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



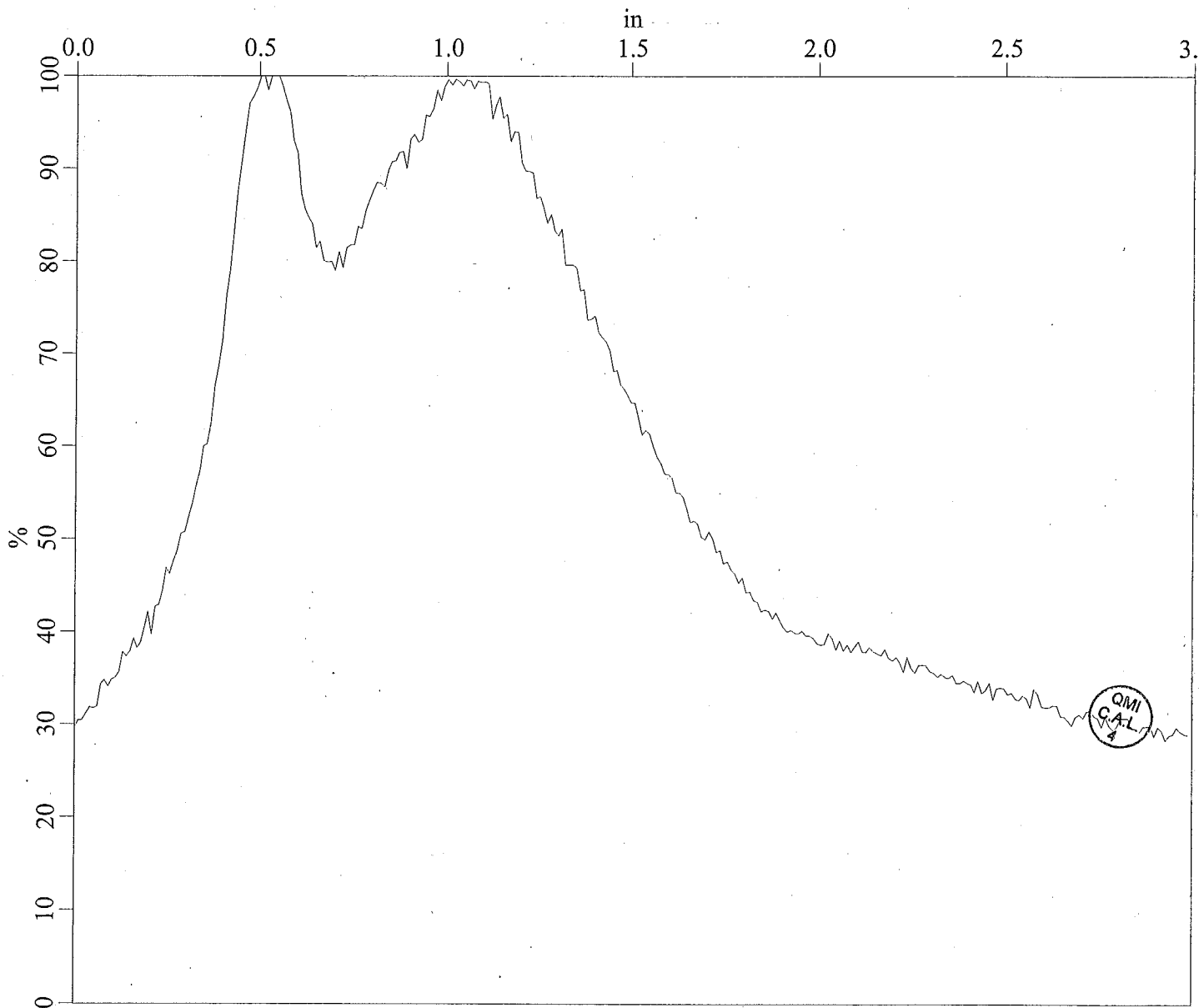
Filename: AS41 D-A (subset 1)
Date: 12/15/08 13:39:45

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 3.000
Resolution: 0.010 (300 points)

VERTICAL AXIS (%)

Start: 0.000
Length: 100.000
Resolution: 0.024 (4096 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

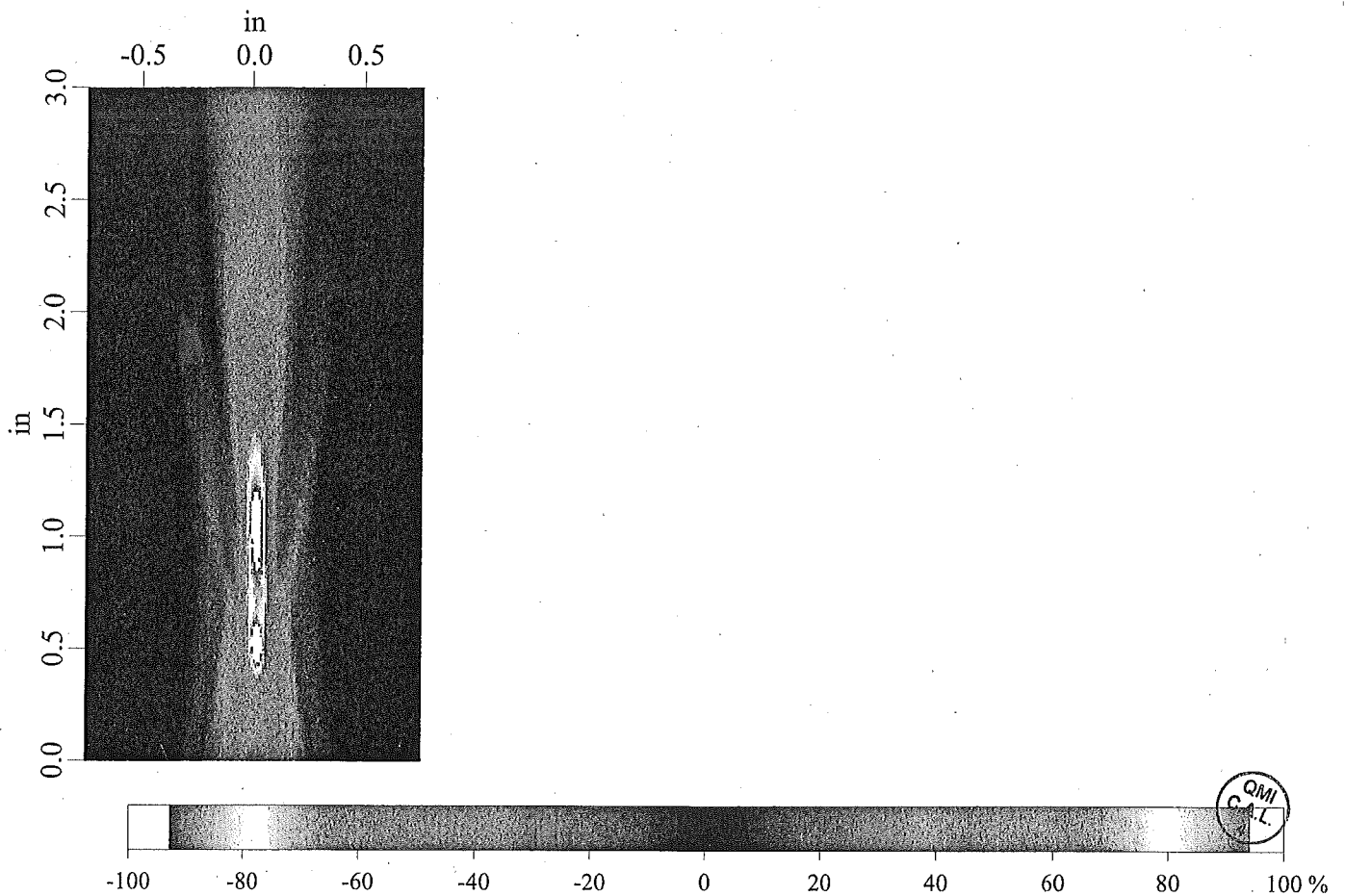
Filename: AS41 Transverse X Cscan (subset 1)
Date: 12/15/08 13:59:35

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 3.000
Resolution: 0.010 (300 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



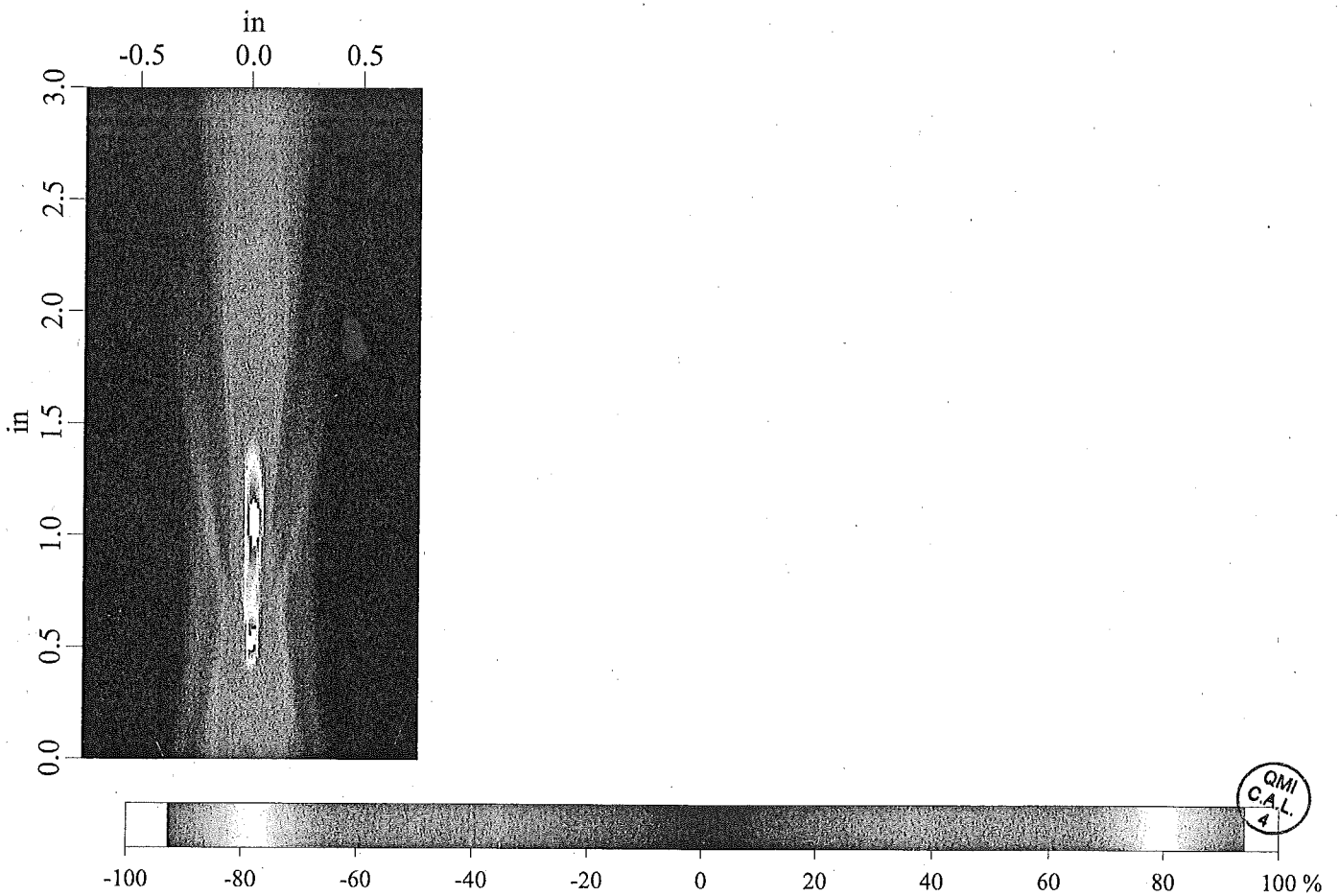
Filename: AS41 Transverse Y Cscan (subset 1)
Date: 12/15/08 14:15:30

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 3.000
Resolution: 0.010 (300 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

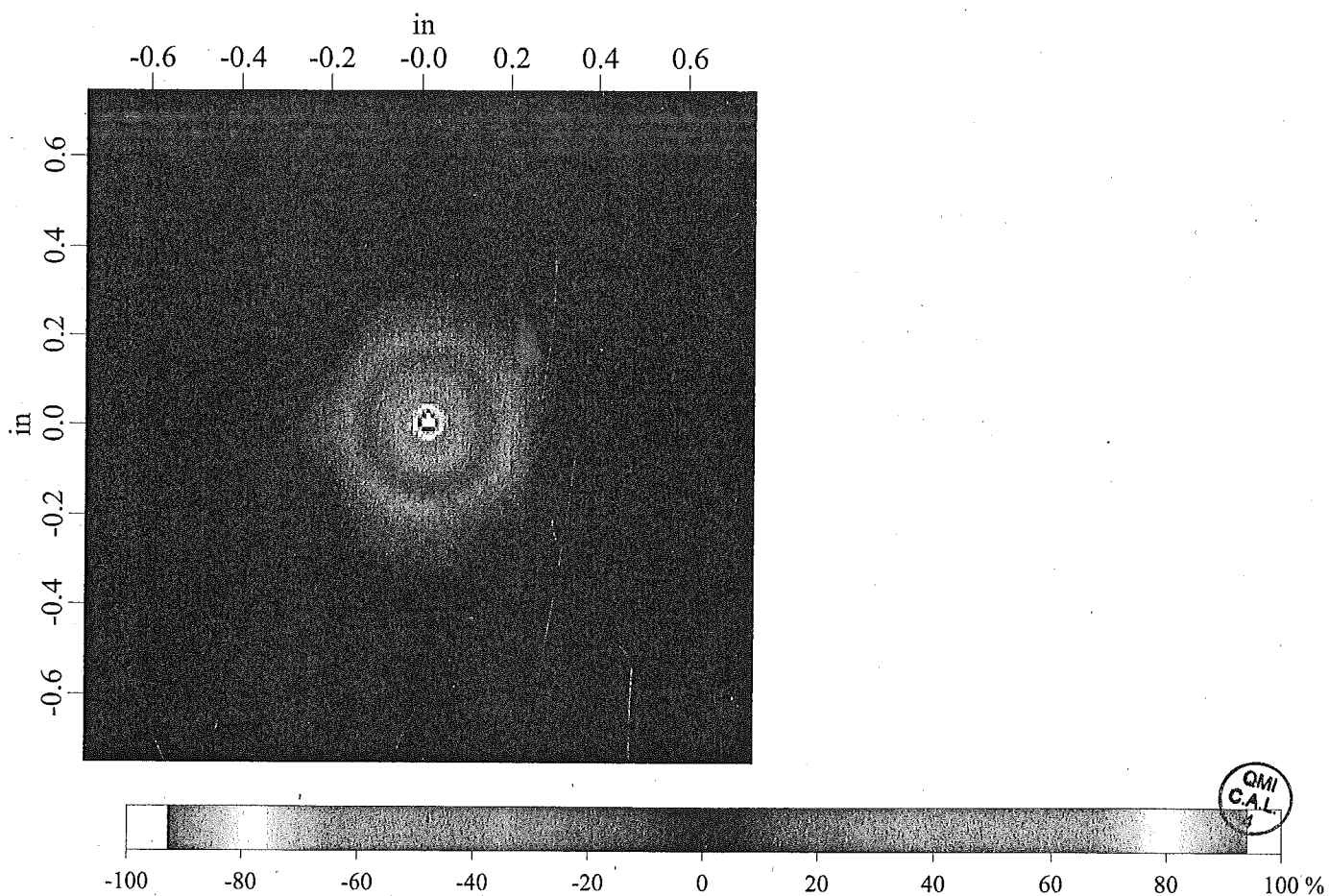
Filename: AS41 Beam Spot Cscan.sdt (subset 1)
Date: 12/15/08 14:15:37

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

Certification Data

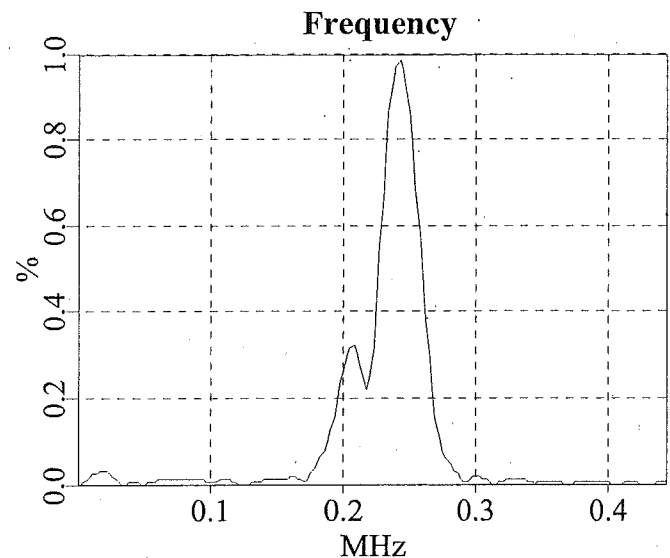
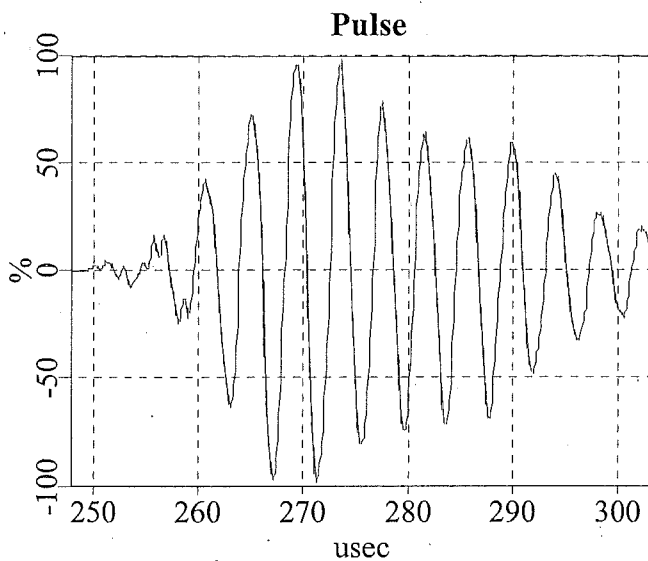
Cert. Number: 0812004
Cert Date: 12/12/2008
Cert. Validity: One Year
Customer: Sonatest PLC
P.O. Number: 6465
TRANSDUCER DATA:
Manufacturer: QMI
Model Number: AS225ARi
Serial Number: AS05
Transducer Type: Airscan Receiver
Frequency: 225kHz

Inspection Instrumentation

Pulser: Panametrics 5800
Pulser S/N: 95041812
NIST Report.: #26298
Data Acq.: QMI MC-DAQ
Data Acq. S/N: 0612001
NIST Report.: #1529
Scanner Model: UPK IIB
Scanner S/N: 1600204611
NIST Report.: #1502A
Reference TX: AN38
NIST Report.: 0801012
Cable: 6ft. 50ohm

Pulser/Receiver Settings

Damping: 500ohm
Energy: 12.5uJ
Gain (dB): 20
Attenuation (dB): 39.6
H. P. filter: 1kHz
L. P. filter: 5MHz
Sensitivity (-dB): 26.3



Pulse Results

Pulse Width @ -6dB: 19.868 usec
Pulse Width @ -20dB:
Peak to Peak Amplitude: 198.584 %

Frequency Results

Peak Frequency: 0.244 MHz
Center Frequency: 0.242 MHz
Low Frequency @ -3dB: 0.230 MHz
High Frequency @ -3dB: 0.254 MHz
Bandwidth @ -3dB: 9.726 %
Low Frequency @ -6dB: 0.226 MHz
High Frequency @ -6dB: 0.259 MHz
Bandwidth @ -6dB: 13.498 %

Documented by:

Measurements per ASTM E-1065-99 with instruments traceable to NIST in accordance with MIL-STD-45662A.



QMIFN-1104 Transducer Characterization

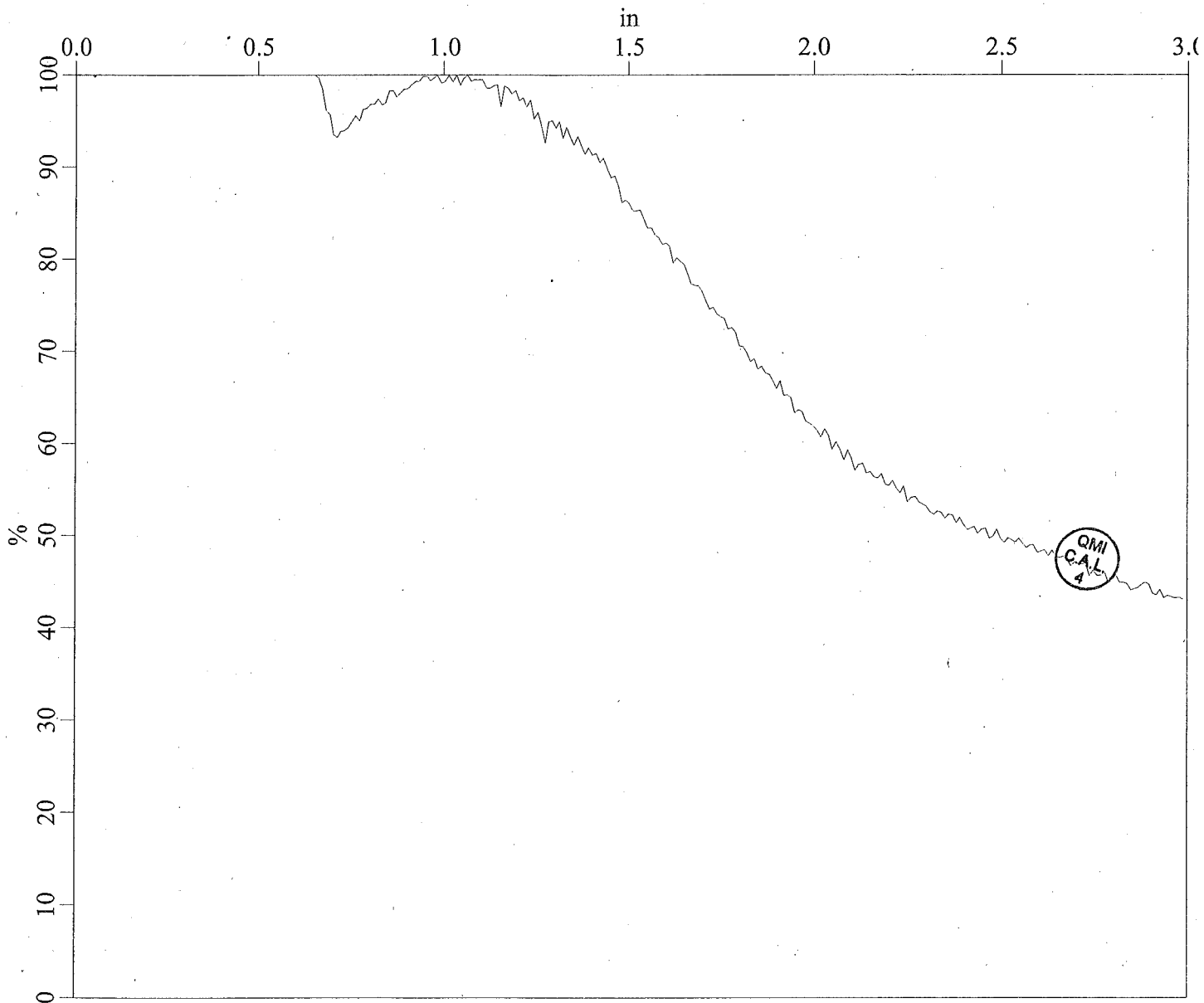
Filename: AS05 D-A (subset 1)
Date: 12/12/08 15:04:13

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 3.000
Resolution: 0.010 (300 points)

VERTICAL AXIS (%)

Start: 0.000
Length: 100.000
Resolution: 0.024 (4096 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

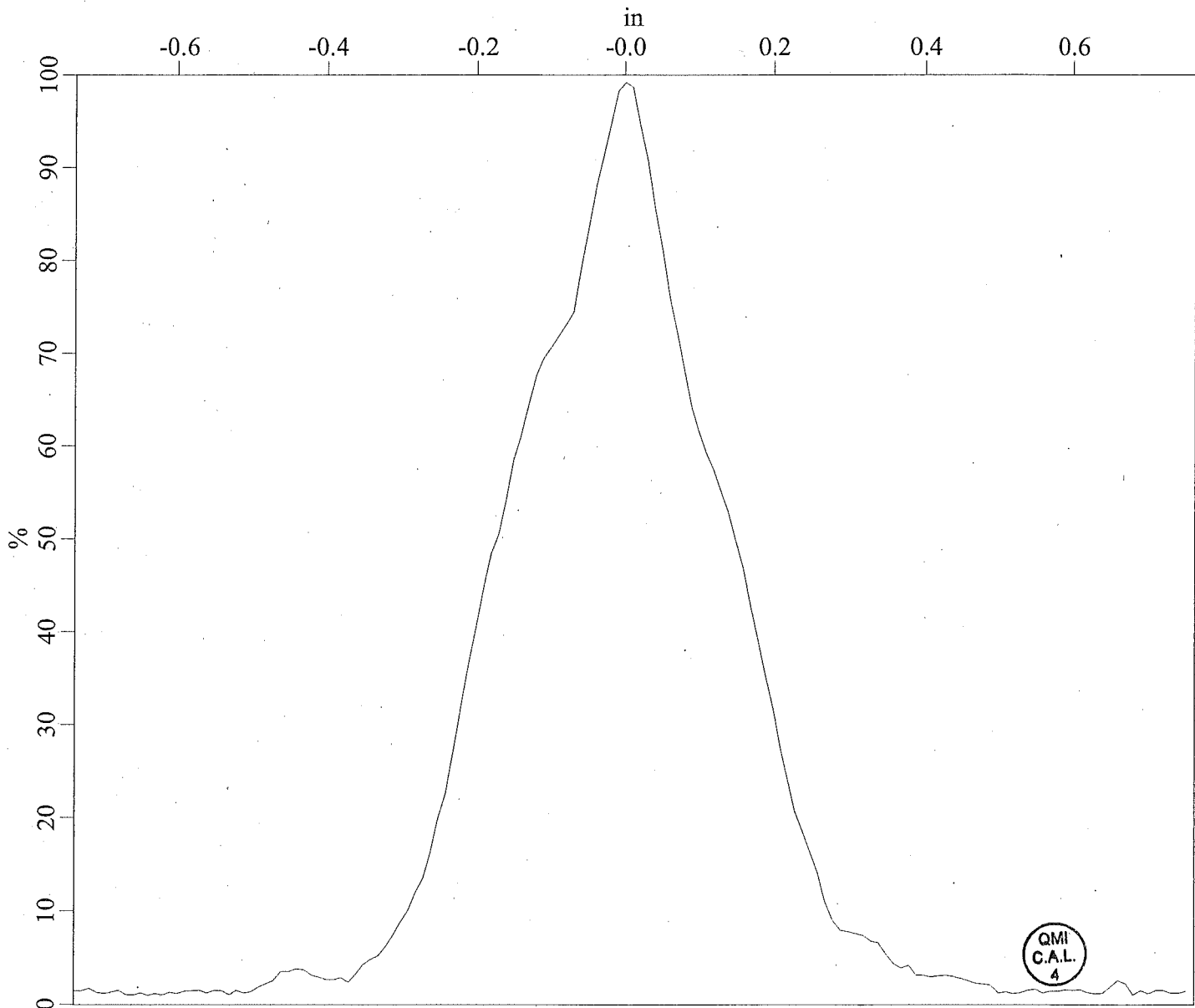
Filename: AS05 DIA (subset 1)
Date: 12/12/08 15:05:08

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.740
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (%)

Start: 0.000
Length: 100.000
Resolution: 0.024 (4096 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

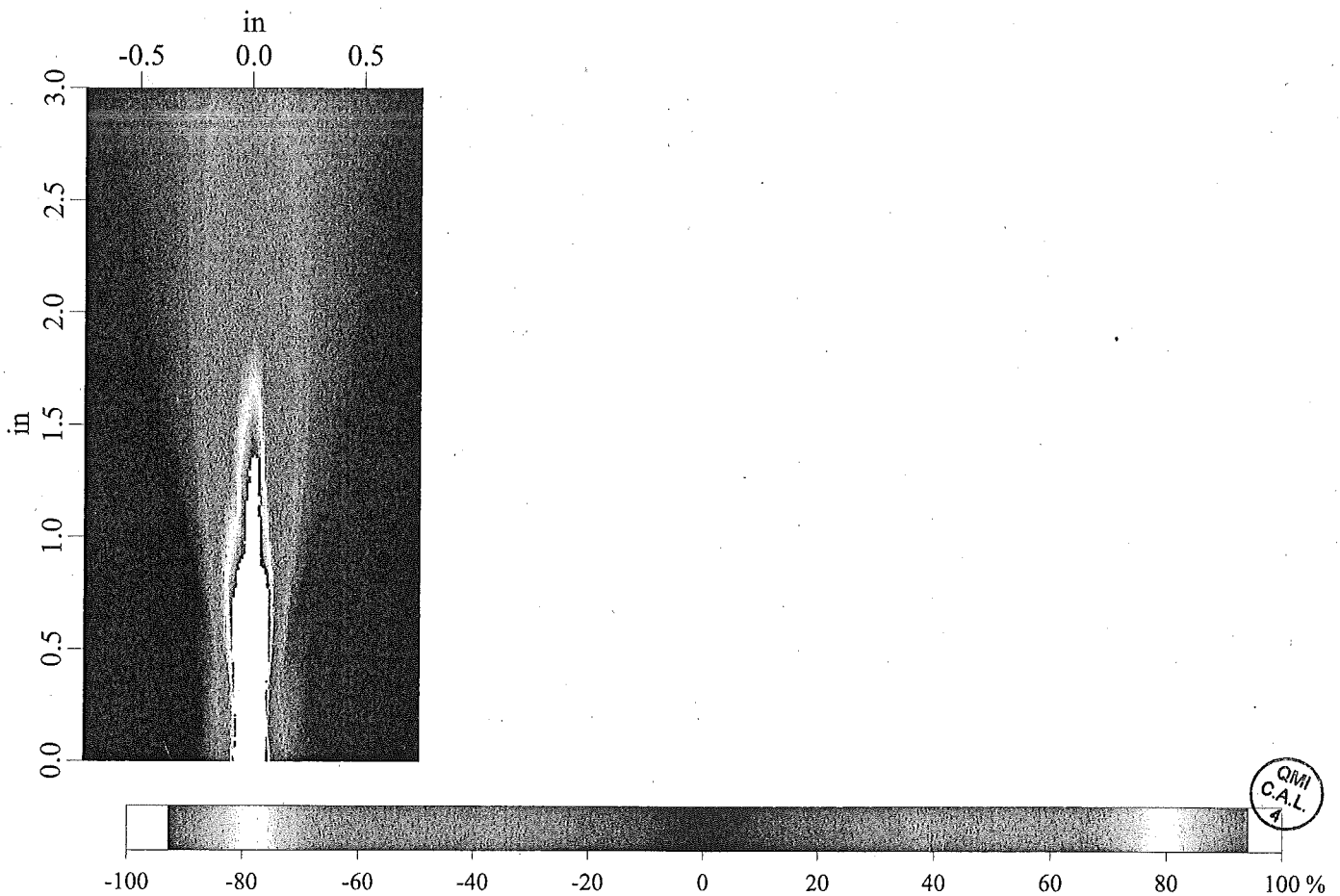
Filename: AS05 Transverse X Cscan (subset 1)
Date: 12/12/08 15:33:40

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 3.000
Resolution: 0.010 (300 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

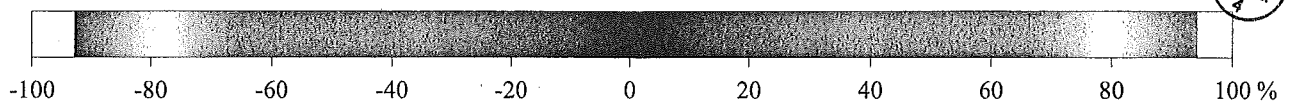
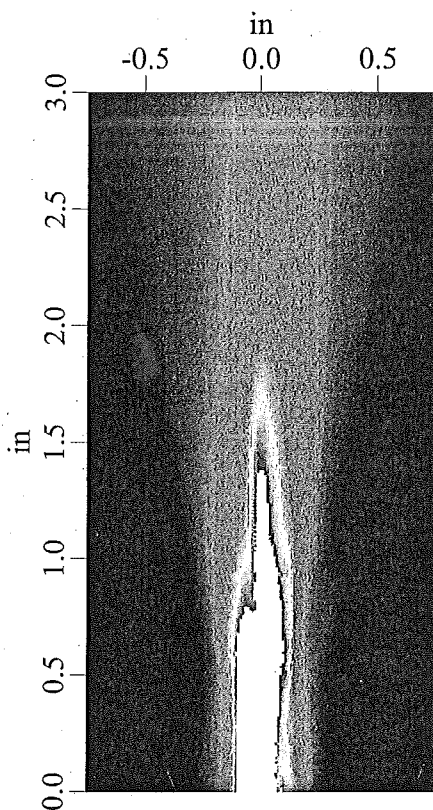
Filename: AS05 Transverse Y Cscan (subset 1)
Date: 12/12/08 15:49:35

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 3.000
Resolution: 0.010 (300 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



Filename: AS05 Beam Spot Cscan (subset 1)

Date: 12/12/08 15:57:06

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750

Length: 1.500

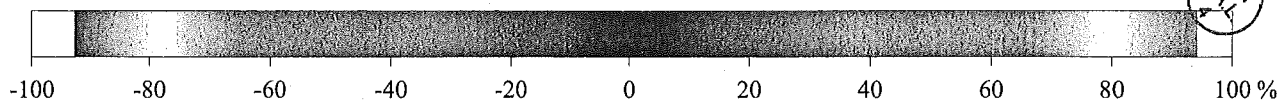
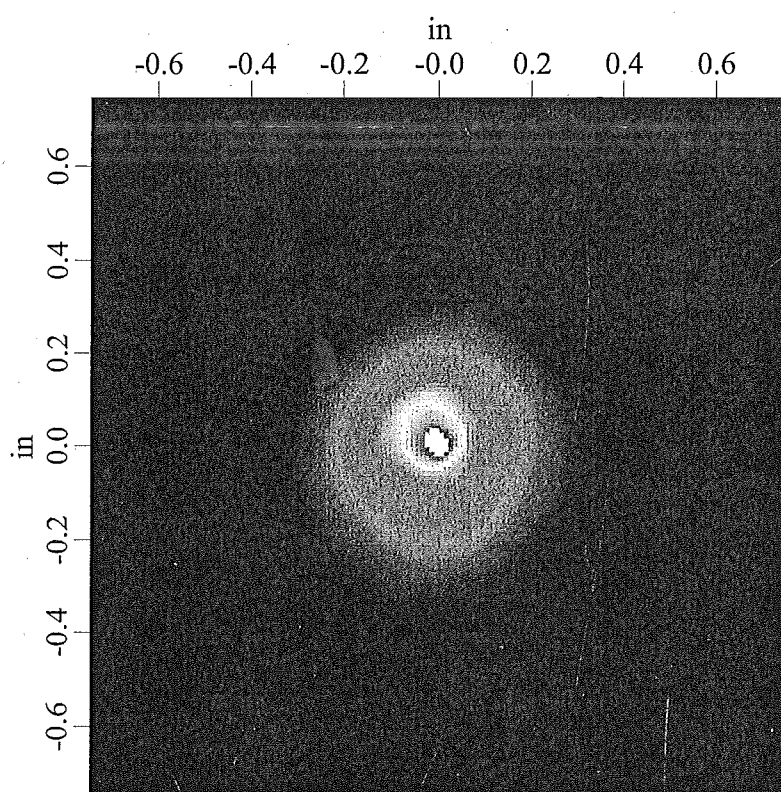
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: -0.750

Length: 1.500

Resolution: 0.010 (150 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

Certification Data

Cert. Number: 0812007
Cert Date: 12/15/2008
Cert. Validity: One Year
Customer: Sonatest PLC
P.O. Number: 6465
TRANSDUCER DATA:
Manufacturer: QMI
Model Number: AS400ARi
Serial Number: AS33
Transducer Type: Aircan Receiver
Frequency: 400kHz

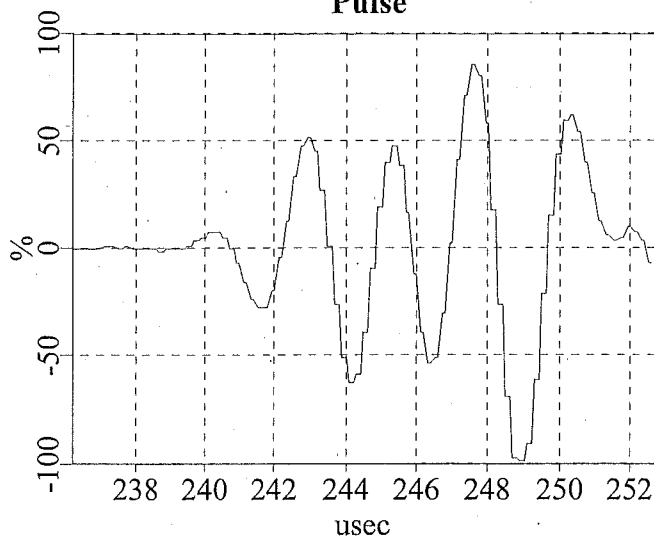
Inspection Instrumentation

Pulser: Panametrics 5800
Pulser S/N: 95041812
NIST Report.: #26298
Data Acq.: QMI MC-DAQ
Data Acq. S/N: 0612001
NIST Report.: #1529
Scanner Model: UPK IIB
Scanner S/N: 1600204611
NIST Report.: #1502A
Reference TX: AN54
NIST Report.: 0801013
Cable: 6ft. 50ohm

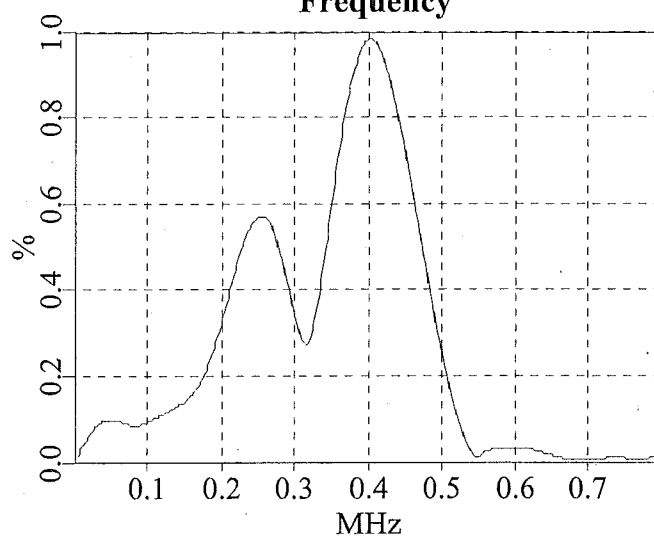
Pulser/Receiver Settings

Damping: 500ohm
Energy: 12.5uJ
Gain (dB): 20
Attenuation (dB): 49.9
H. P. filter: 1kHz
L. P. filter: 5MHz
Sensitivity (-dB): 16

Pulse



Frequency



Pulse Results

Pulse Width @ -6dB: 3.784 usec
Pulse Width @ -20dB: 10.977 usec
Peak to Peak Amplitude: 186.523 %

Frequency Results

Peak Frequency: 0.405 MHz
Center Frequency: 0.407 MHz
Low Frequency @ -3dB: 0.358 MHz
High Frequency @ -3dB: 0.452 MHz
Bandwidth @ -3dB: 23.209 %
Low Frequency @ -6dB: 0.342 MHz
High Frequency @ -6dB: 0.473 MHz
Bandwidth @ -6dB: 32.162 %

Documented by:

Measurements per ASTM E-1065-99 with instruments traceable to NIST in accordance with MIL-STD-45662A.



QMIFN-1104 Transducer Characterization

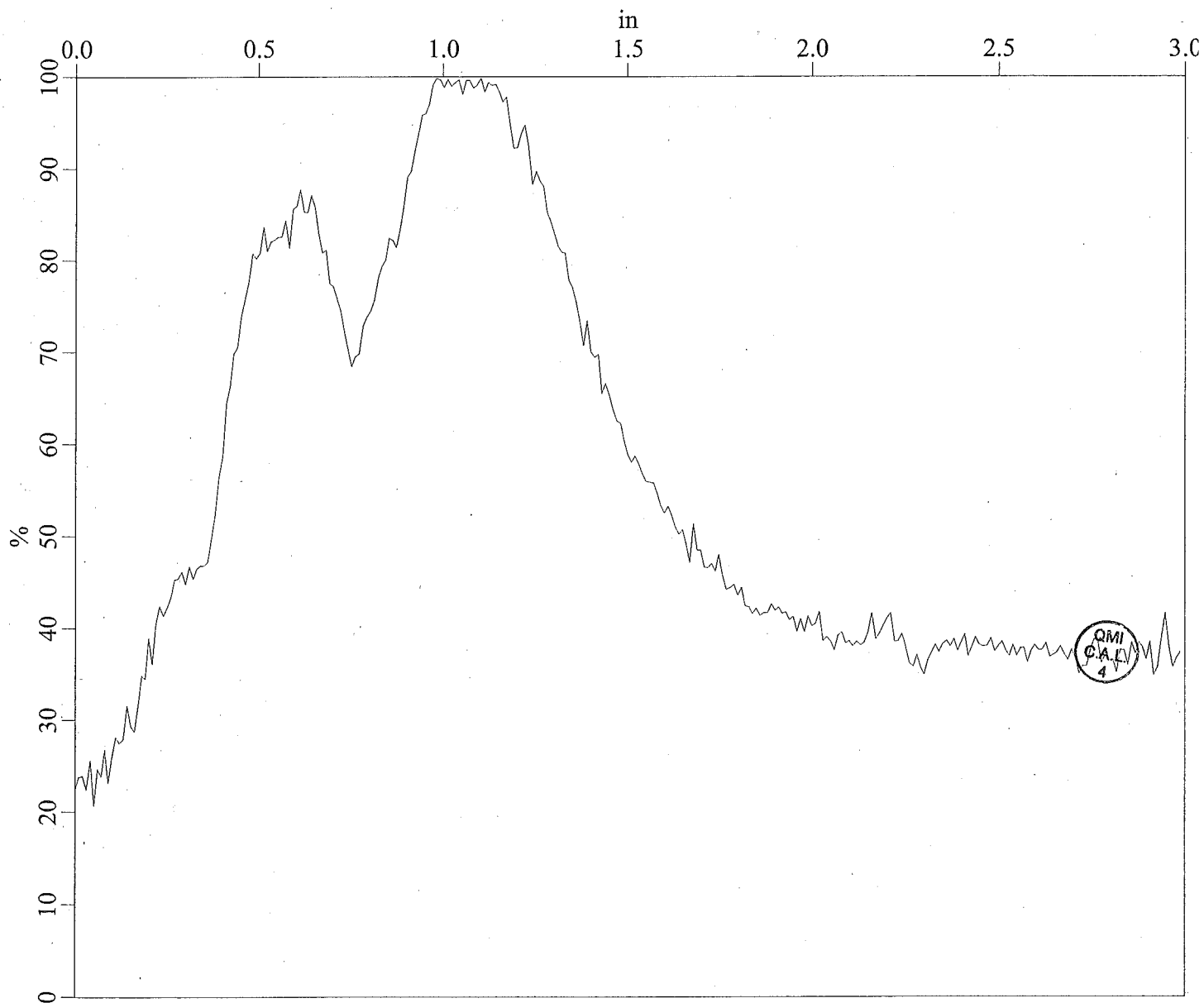
Filename: AS33 D-A (subset 1)
Date: 12/15/08 12:18:44

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 3.000
Resolution: 0.010 (300 points)

VERTICAL AXIS (%)

Start: 0.000
Length: 100.000
Resolution: 0.024 (4096 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



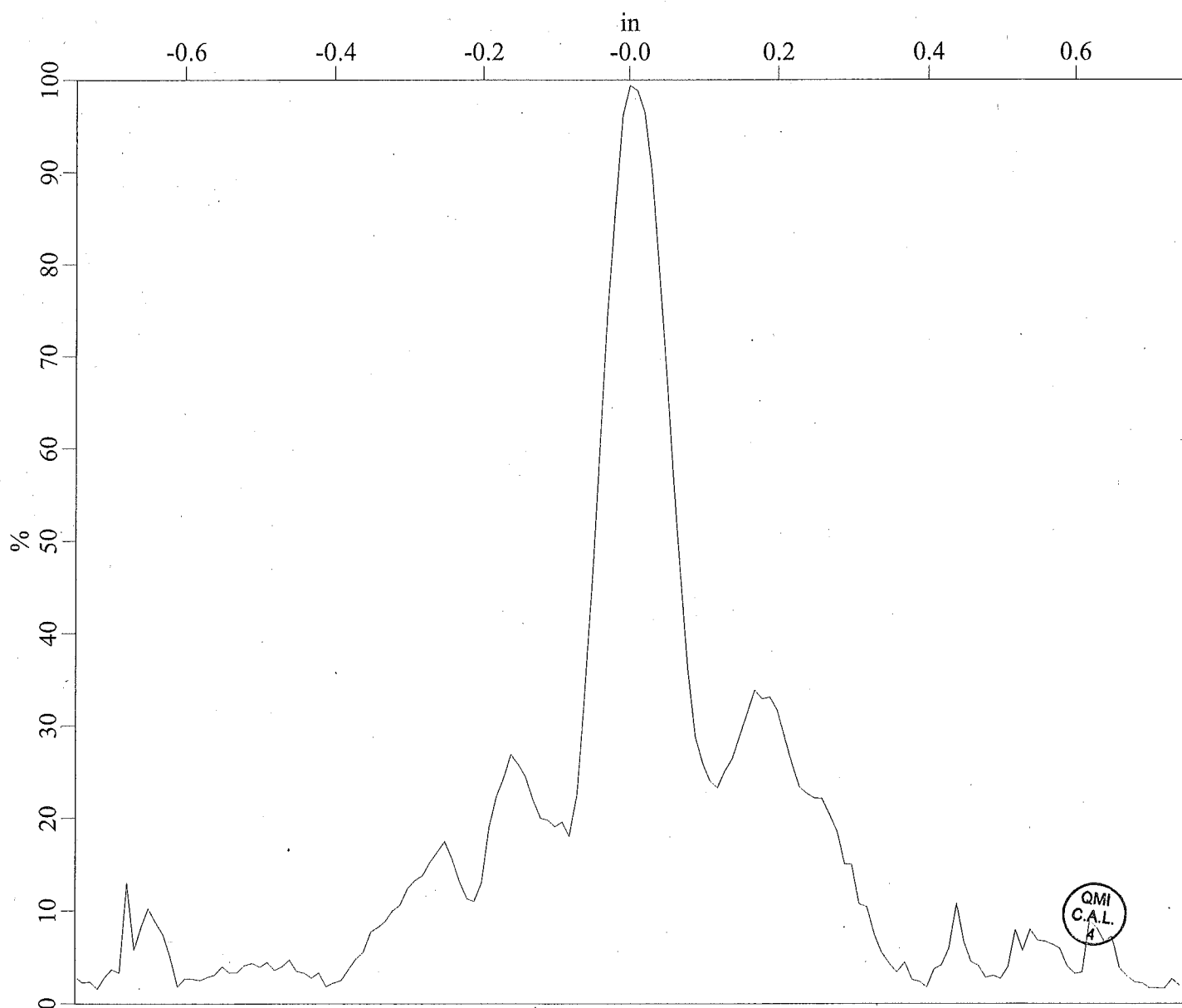
Filename: AS33 DIA (subset 1)
Date: 12/15/08 12:18:29

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (%)

Start: 0.000
Length: 100.000
Resolution: 0.024 (4096 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



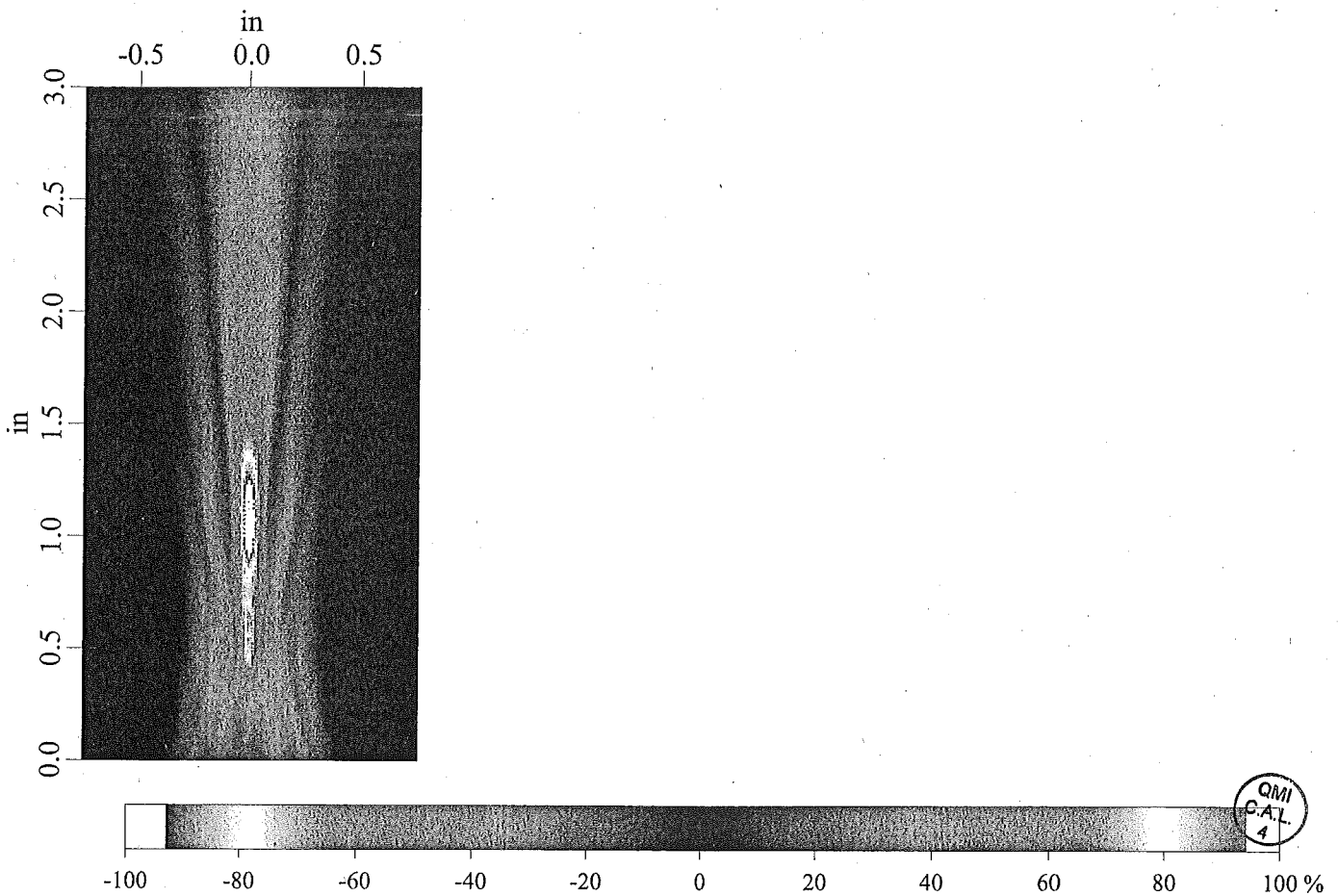
Filename: AS33 Transverse X Cscan (subset 1)
Date: 12/15/08 12:37:26

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 3.000
Resolution: 0.010 (300 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



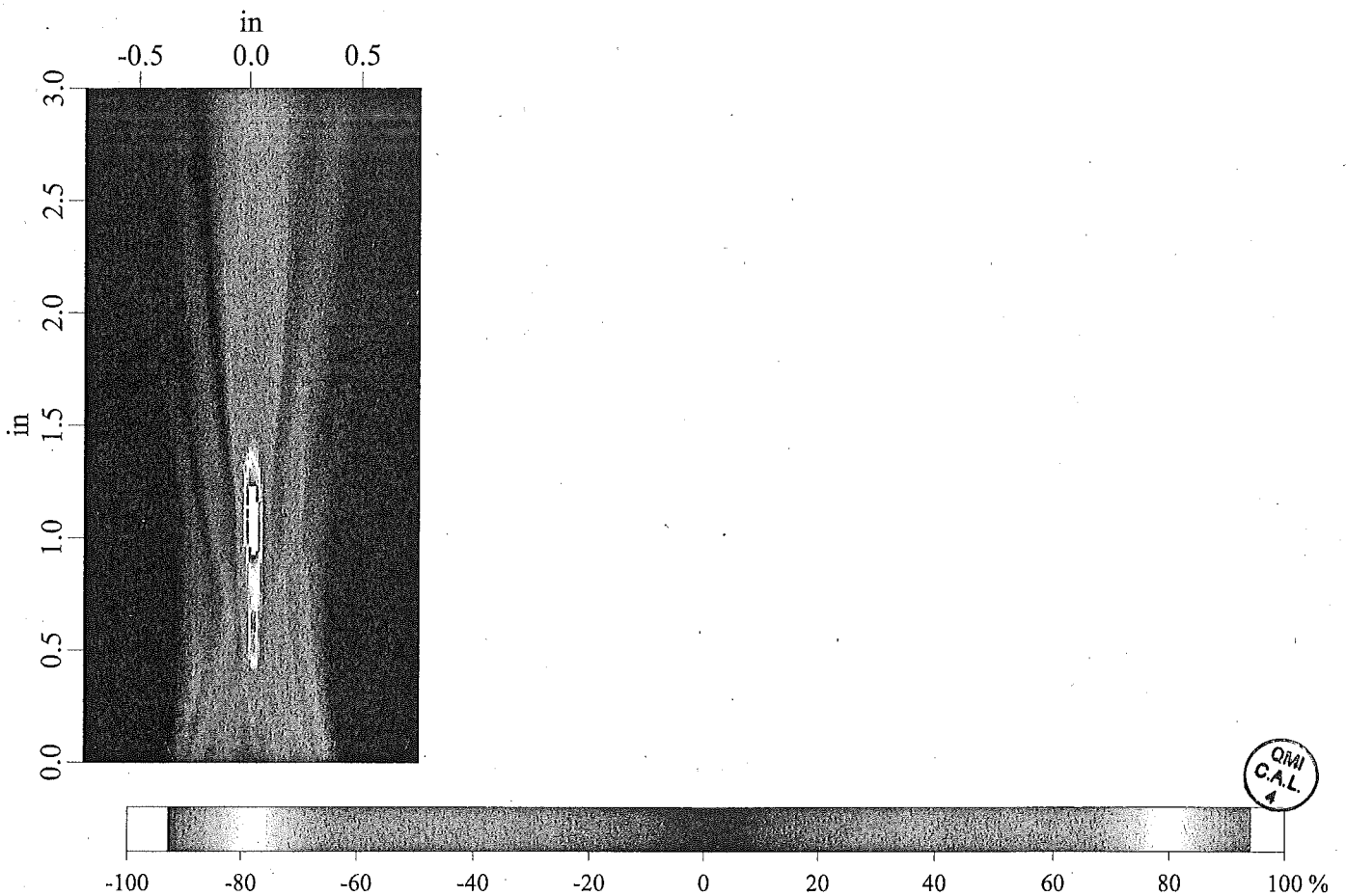
Filename: AS33 Transverse Y Cscan (subset 1)
Date: 12/15/08 12:57:52

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 3.000
Resolution: 0.010 (300 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



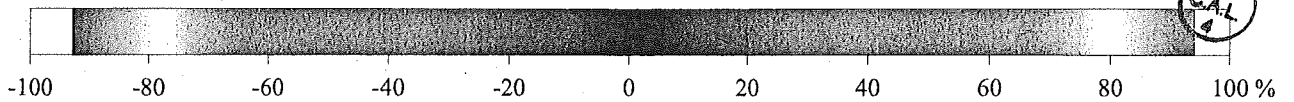
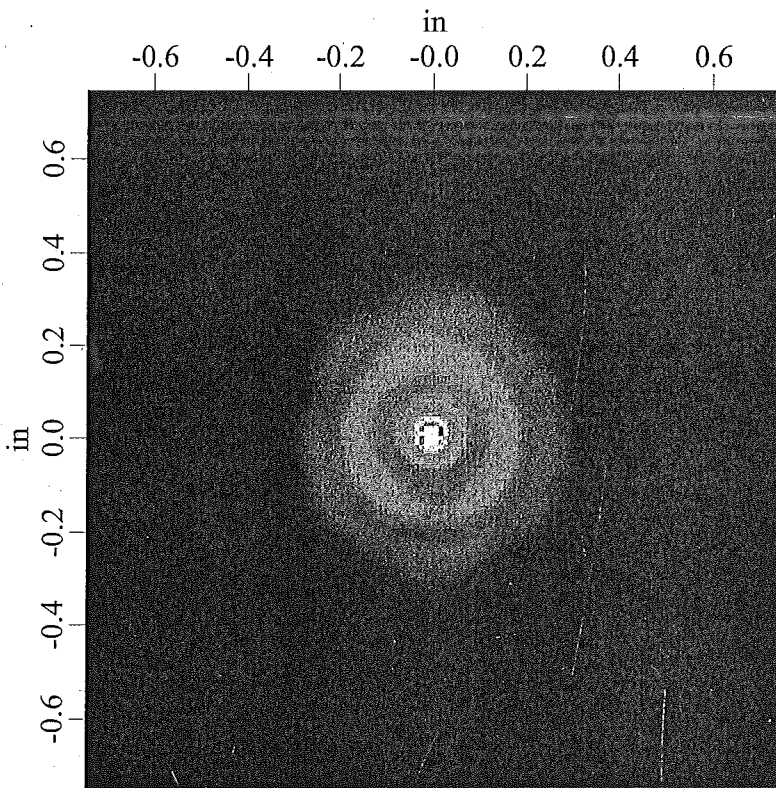
Filename: AS33 Beam Spot Cscan.sdt (subset 1)
Date: 12/15/08 12:57:59

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

Certification Data

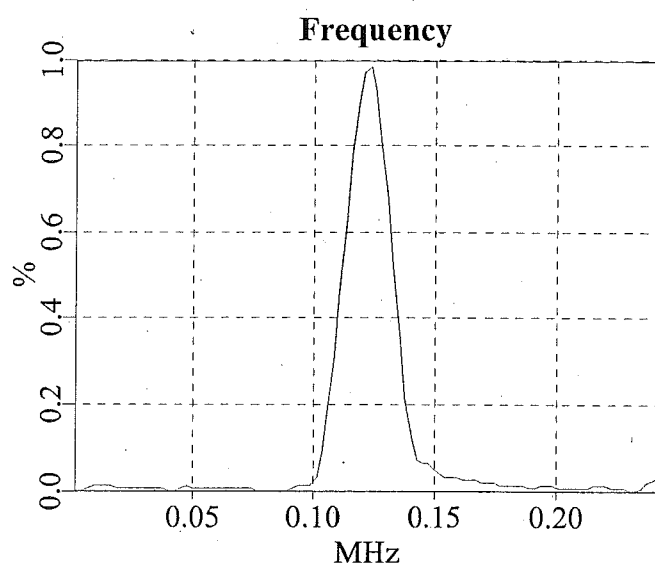
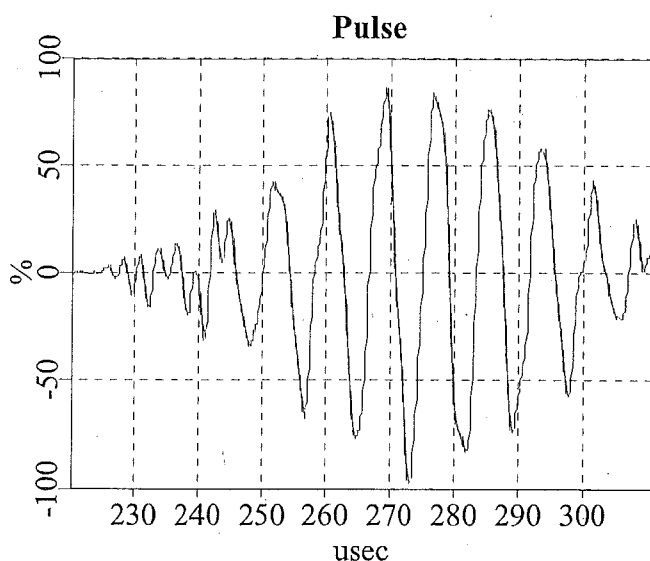
Cert. Number: 0811006
Cert Date: 11/21/2008
Cert. Validity: One Year
Customer: Sonatest
P.O. Number: 6465
TRANSDUCER DATA:
Manufacturer: QMI
Model Number: AS120ARi
Serial Number: AR89
Transducer Type: Airscan Receiver
Frequency: 120kHz

Inspection Instrumentation

Pulser: Panametrics 5800
Pulser S/N: 95041812
NIST Report.: #26298
Data Acq.: QMI MC-DAQ
Data Acq. S/N: 0612001
NIST Report.: #1529
Scanner Model: UPK IIB
Scanner S/N: 1600204611
NIST Report.: #1502A
Reference TX: AM64
NIST Report.: 0801006
Cable: 6ft. 50ohm

Pulser/Receiver Settings

Damping: 500ohm
Energy: 12.5uJ
Gain (dB): 20
Attenuation (dB): 54.1
H. P. filter: 1kHz
L. P. filter: 5MHz
Sensitivity (-dB): 11.8



Pulse Results

Pulse Width @ -6dB: 2.743 usec
Pulse Width @ -20dB: 55.651 usec
Peak to Peak Amplitude: 186.133 %

Frequency Results

Peak Frequency: 0.124 MHz
Center Frequency: 0.121 MHz
Low Frequency @ -3dB: 0.114 MHz
High Frequency @ -3dB: 0.129 MHz
Bandwidth @ -3dB: 12.930 %
Low Frequency @ -6dB: 0.110 MHz
High Frequency @ -6dB: 0.132 MHz
Bandwidth @ -6dB: 18.042 %

Documented by:

Measurements per ASTM E-1065-99 with instruments traceable to NIST in accordance with MIL-STD-45662A.



QMIFN-1104 Transducer Characterization

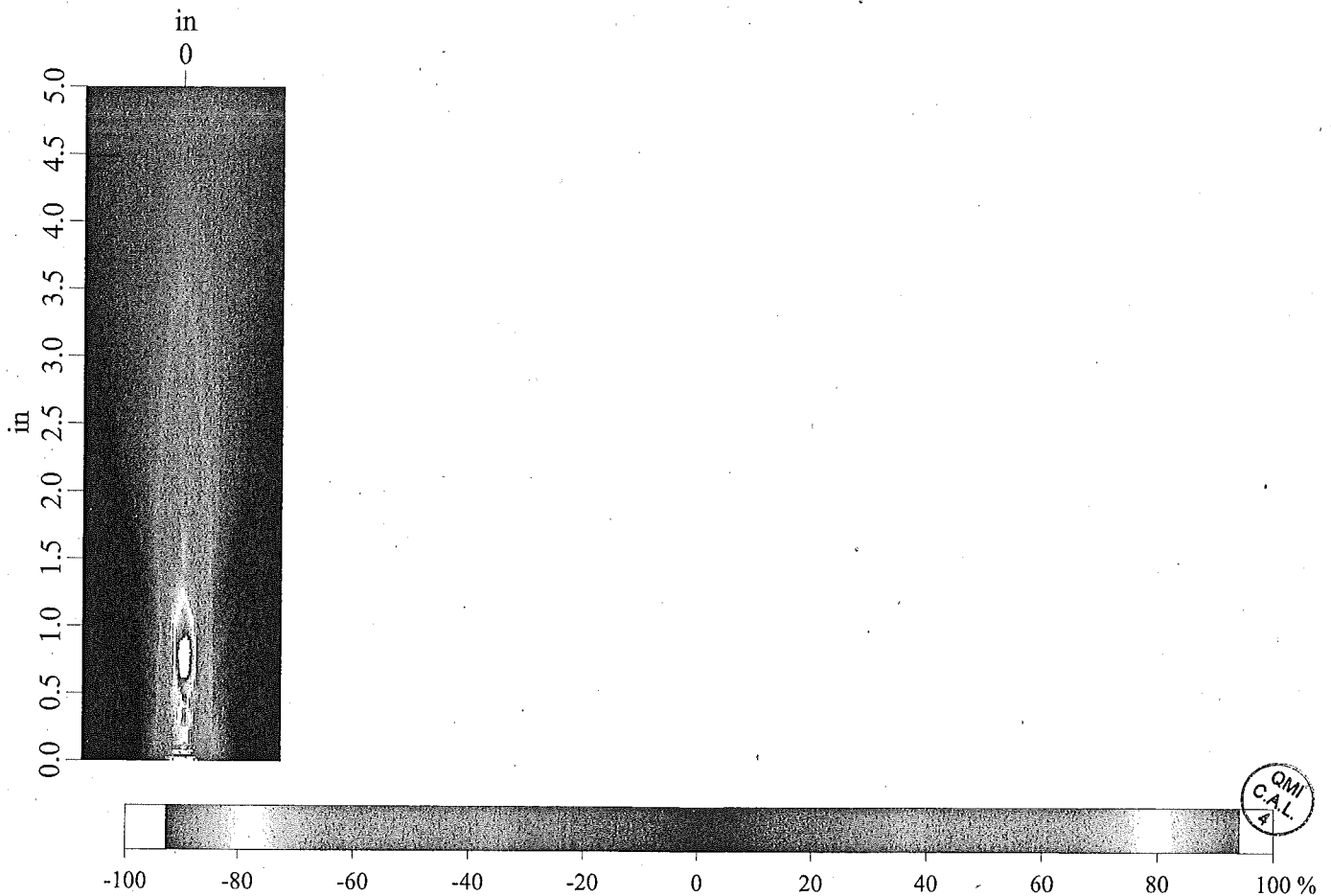
Filename: AR89 Transverse Y Cscan (subset 1)
Date: 11/14/08 13:33:07

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 5.000
Resolution: 0.010 (500 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



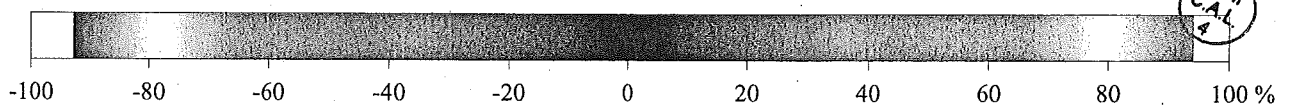
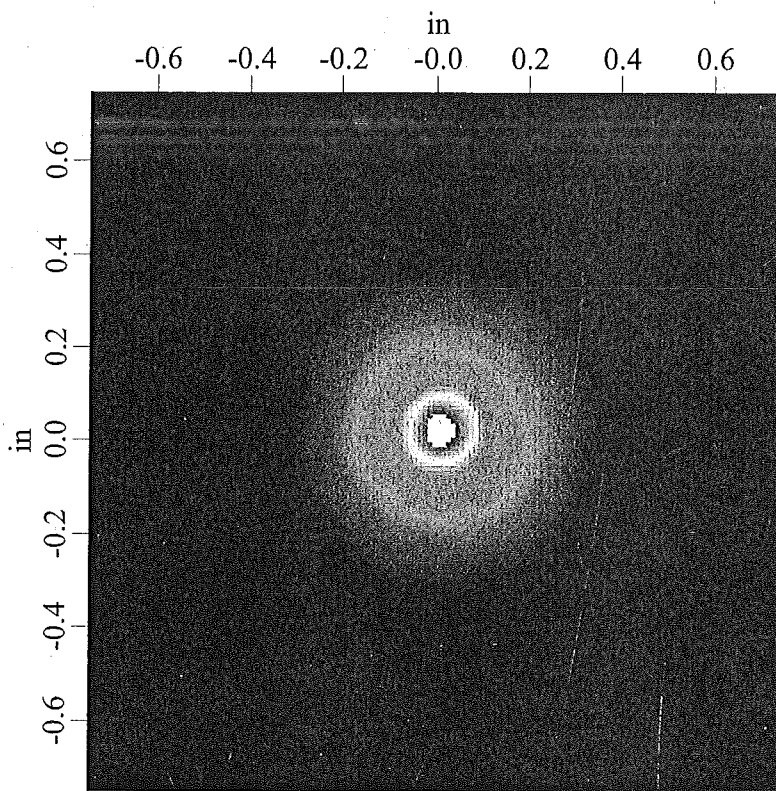
Filename: AR89 Beam Spot Cscan (subset 1)
Date: 11/14/08 13:40:45

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: -0.750
Length: 1.500
Resolution: 0.010 (150 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

Certification Data

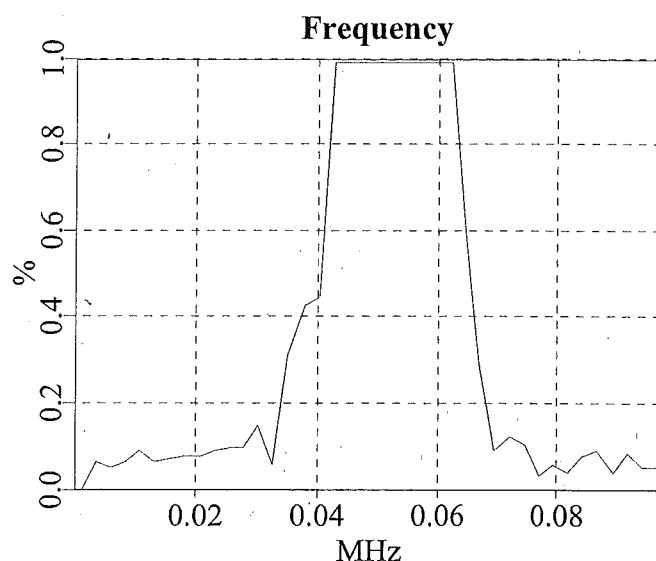
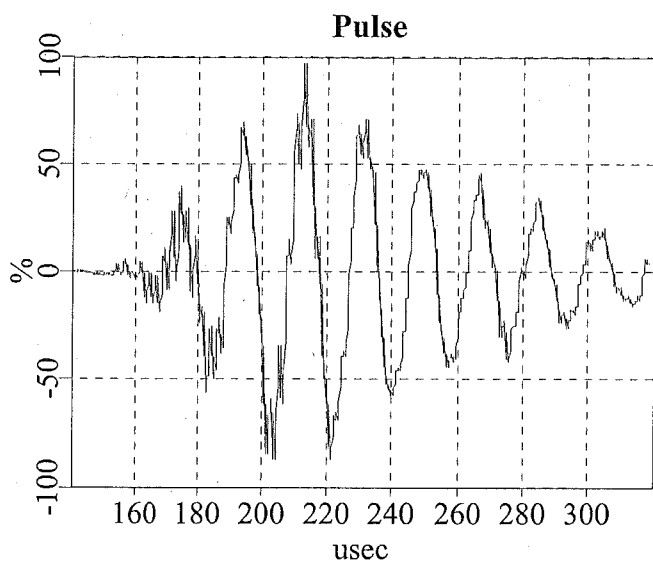
Cert. Number: 0812003
Cert Date: 12/12/2008
Cert. Validity: One Year
Customer: Sonatest PLC
P.O. Number: 6465
TRANSDUCER DATA:
Manufacturer: QMI
Model Number: AS50Ti
Serial Number: AR07
Transducer Type: Aircan Transmitter
Frequency: 50kHz

Inspection Instrumentation

Pulser: Panametrics 5800
Pulser S/N: 95041812
NIST Report.: #26298
Data Acq.: QMI MC-DAQ
Data Acq. S/N: 0612001
NIST Report.: #1529
Scanner Model: UPK IIB
Scanner S/N: 1600204611
NIST Report.: #1502A
Reference TX: AR01
NIST Report.: 0801015
Cable: 6ft. 50ohm

Pulser/Receiver Settings

Damping: 500ohm
Energy: 100uJ
Gain (dB): 40
Attenuation (dB): 12.7
H. P. filter: 1kHz
L. P. filter: 5MHz
Sensitivity (-dB): 73.2



Pulse Results

Pulse Width @ -6dB: 4.300 usec
Pulse Width @ -20dB: 7.655 usec
Peak to Peak Amplitude: 186.963 %

Frequency Results

Peak Frequency: 0.054 MHz
Center Frequency: 0.052 MHz
Low Frequency @ -3dB: 0.040 MHz
High Frequency @ -3dB: 0.063 MHz
Bandwidth @ -3dB: 43.942 %
Low Frequency @ -6dB: 0.039 MHz
High Frequency @ -6dB: 0.064 MHz
Bandwidth @ -6dB: 48.285 %

Documented by:

Measurements per ASTM E-1065-99 with instruments traceable to NIST in accordance with MIL-STD-45662A.

QMIFN-1104 Transducer Characterization



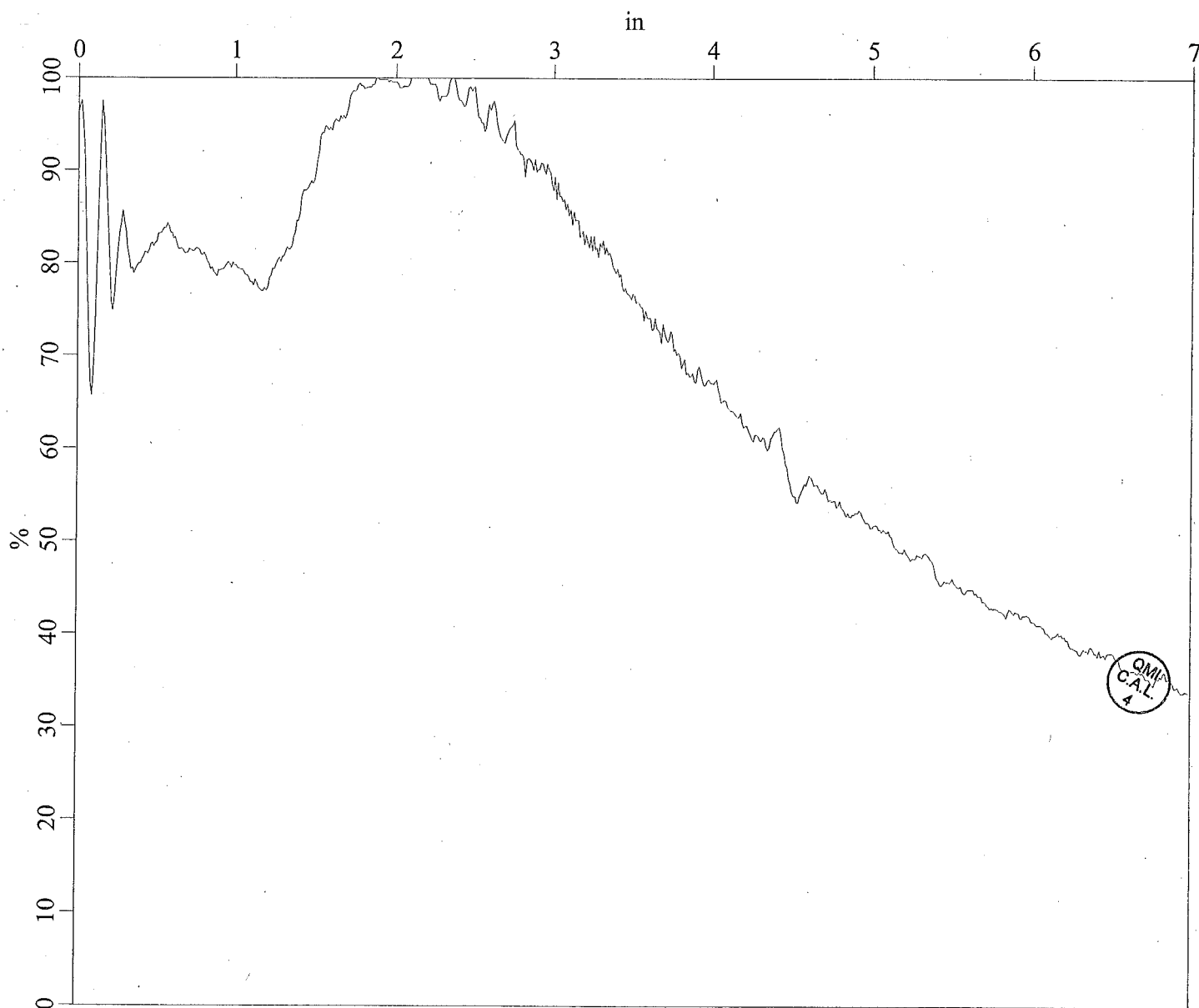
Filename: AR07 Ascan and Xsections (subset 1)
Date: 12/12/08 09:03:46

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 7.000
Resolution: 0.010 (700 points)

VERTICAL AXIS (%)

Start: 0.000
Length: 100.000
Resolution: 0.024 (4096 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

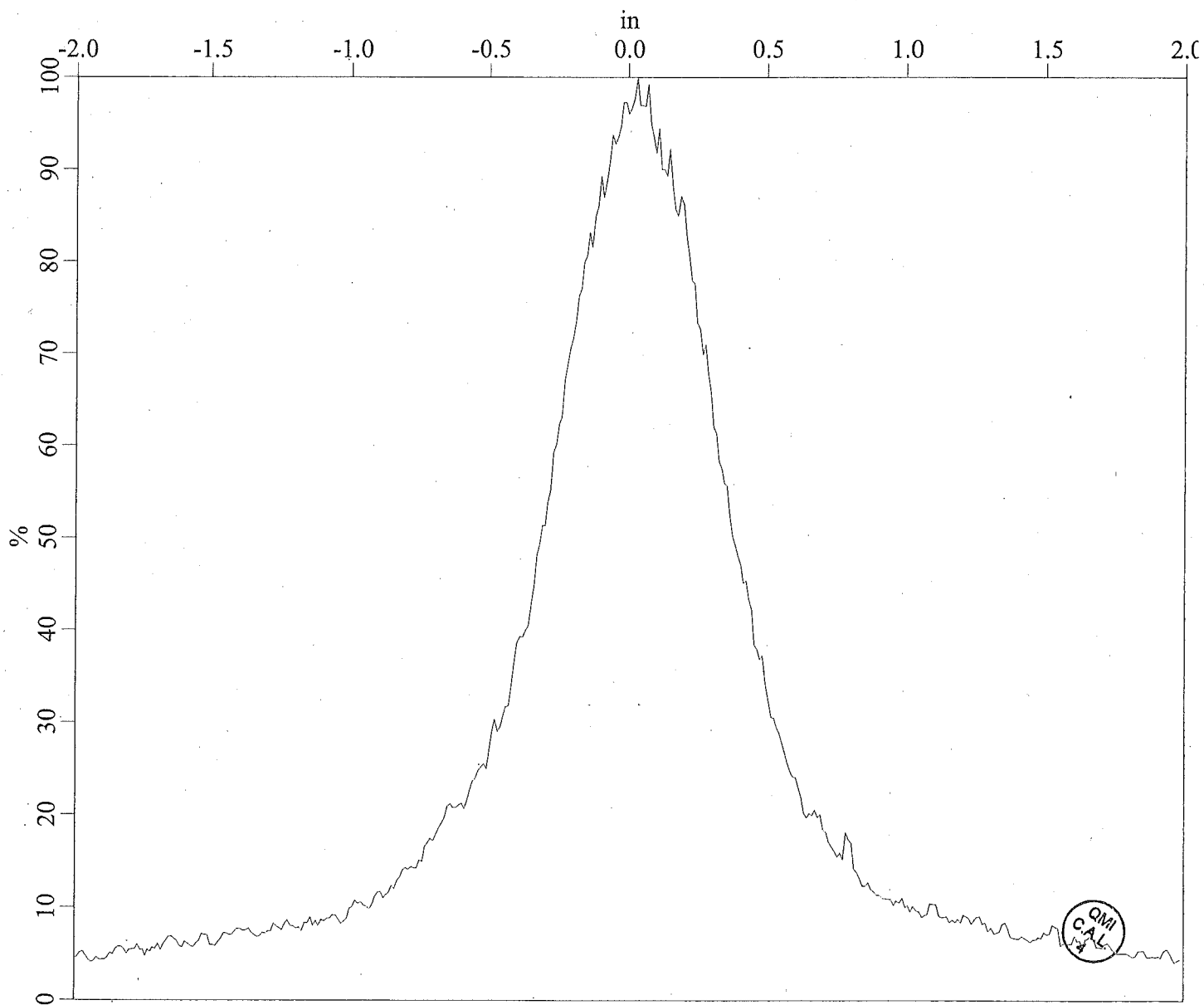
Filename: AR07 DIA (subset 1)
Date: 12/12/08 14:13:46

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -2.000
Length: 4.000
Resolution: 0.010 (400 points)

VERTICAL AXIS (%)

Start: 0.000
Length: 100.000
Resolution: 0.024 (4096 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



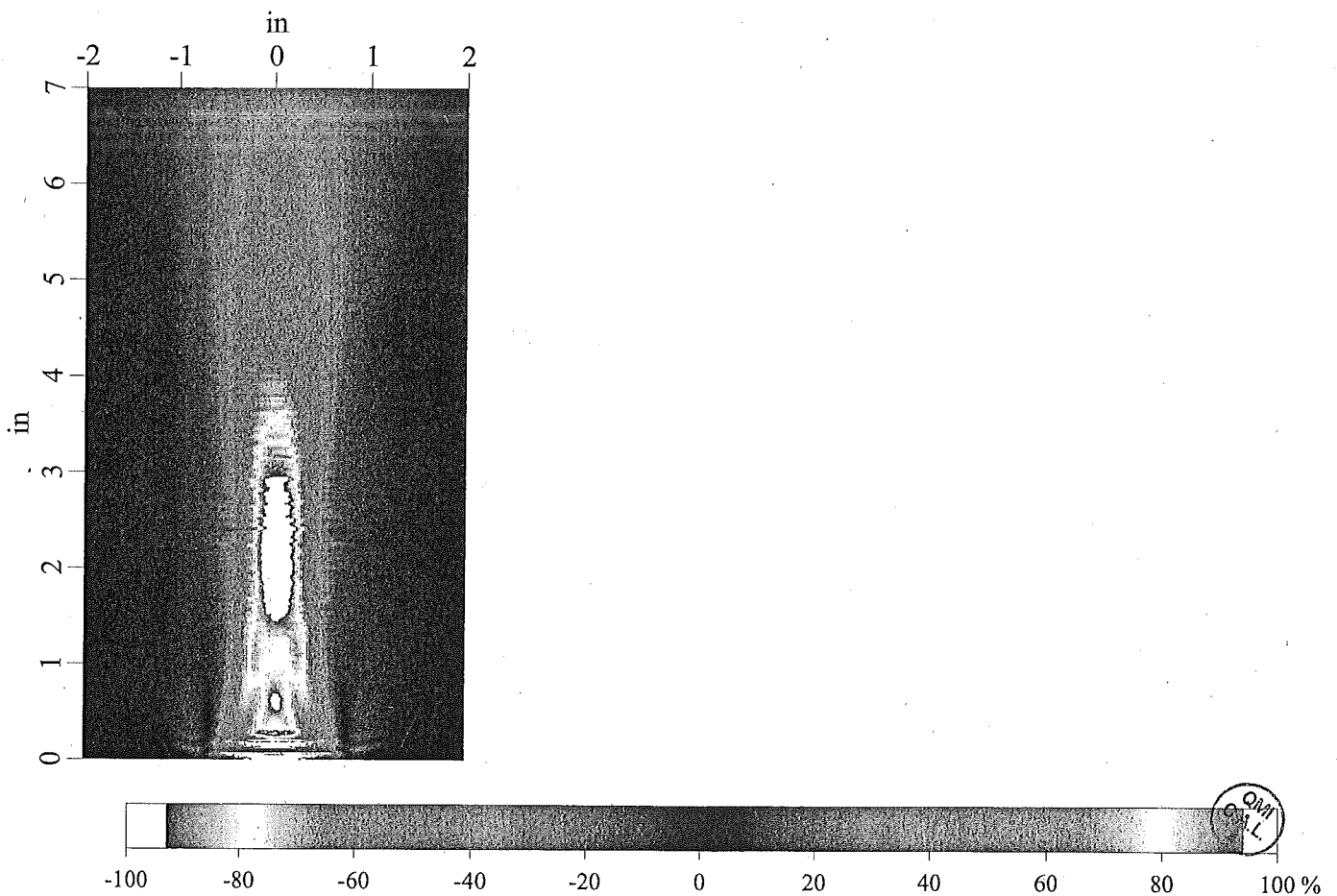
Filename: AR07 Transverse X Cscan (subset 1)
Date: 12/12/08 11:13:11

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -2.000
Length: 4.000
Resolution: 0.010 (400 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 7.000
Resolution: 0.010 (700 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



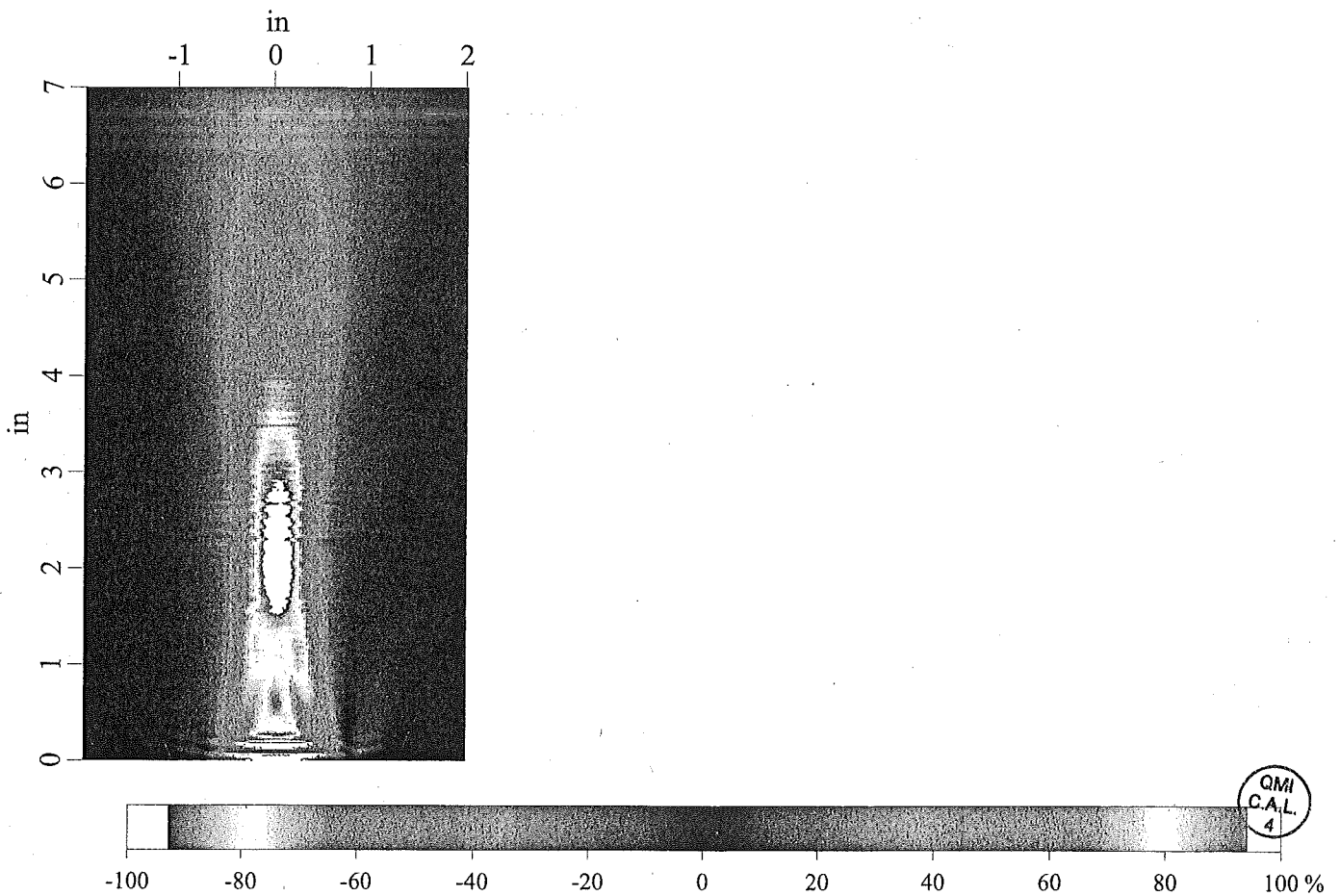
Filename: AR07 Transverse Y Cscan (subset 1)
Date: 12/12/08 13:17:39

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -1.999
Length: 4.000
Resolution: 0.010 (400 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 7.000
Resolution: 0.010 (700 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



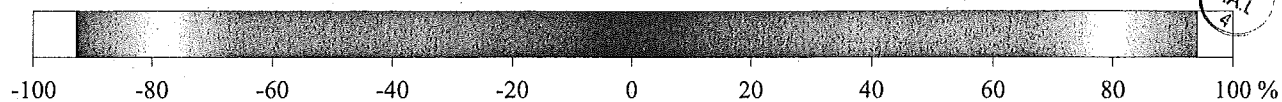
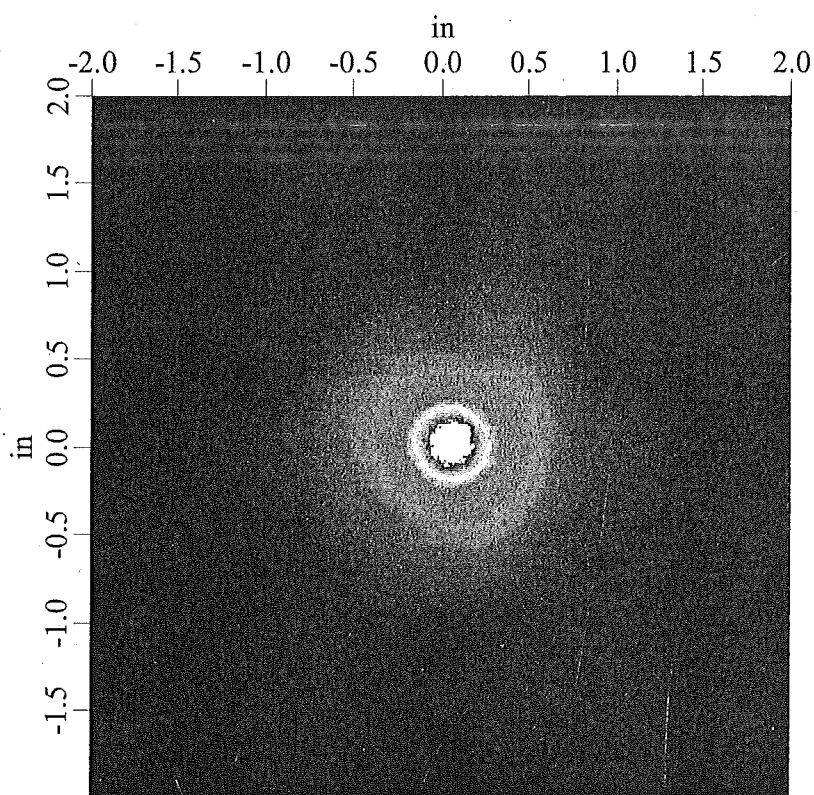
Filename: AR07 Beam Spot Cscan (subset 1)
Date: 12/12/08 14:26:08

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -2.000
Length: 4.000
Resolution: 0.010 (400 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: -1.999
Length: 4.000
Resolution: 0.010 (400 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

Certification Data

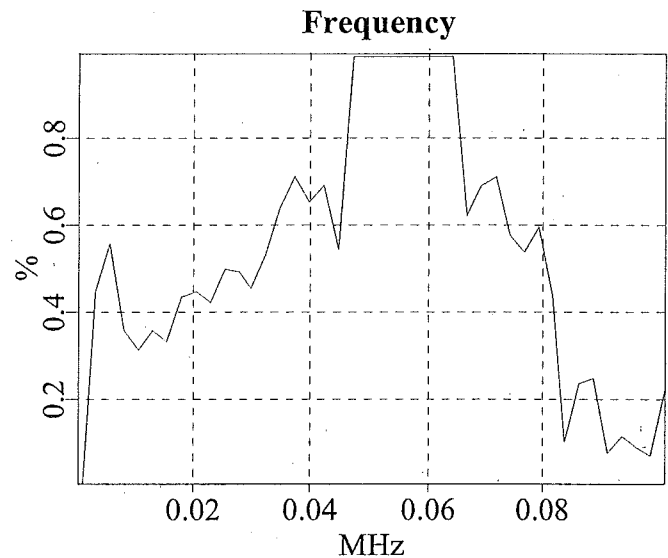
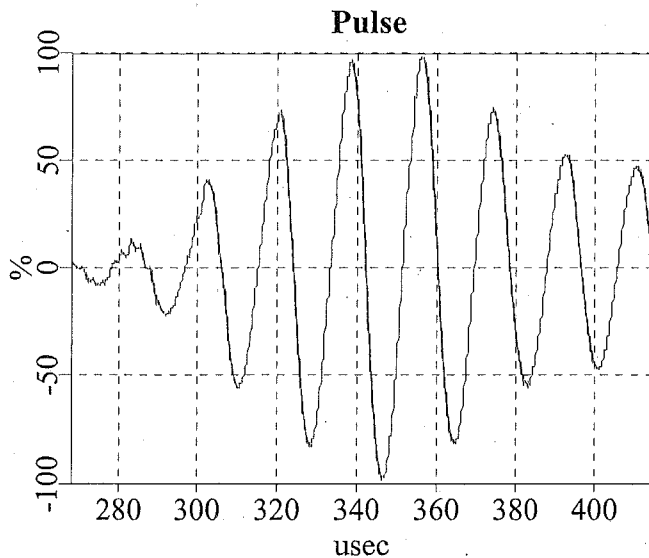
Cert. Number: 0812002
Cert Date: 12/05/2008
Cert. Validity: One Year
Customer: Sonatest PLC
P.O. Number: 6465
TRANSDUCER DATA:
Manufacturer: QMI
Model Number: AS50ARi
Serial Number: AR23
Transducer Type: Airscan Receiver
Frequency: 50kHz

Inspection Instrumentation

Pulser: Panametrics 5800
Pulser S/N: 95041812
NIST Report.: #26298
Data Acq.: QMI MC-DAQ
Data Acq. S/N: 0612001
NIST Report.: #1529
Scanner Model: UPK IIB
Scanner S/N: 1600204611
NIST Report.: #1502A
Reference TX: AR01
NIST Report.: 0801015
Cable: 6ft. 50ohm

Pulser/Receiver Settings

Damping: 150ohm
Energy: 100uJ
Gain (dB): 20
Attenuation (dB): 2.8
H. P. filter: 30kHz
L. P. filter: 60kHz
Sensitivity (-dB): 27.7

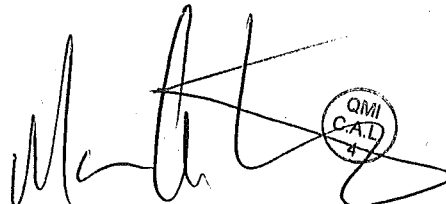


Pulse Results

Pulse Width @ -6dB: 6.375 usec
Pulse Width @ -20dB: 98.394 usec
Peak to Peak Amplitude: 199.072 %

Frequency Results

Peak Frequency: 0.056 MHz
Center Frequency: 0.055 MHz
Low Frequency @ -3dB: 0.045 MHz
High Frequency @ -3dB: 0.065 MHz
Bandwidth @ -3dB: 37.384 %
Low Frequency @ -6dB: 0.031 MHz
High Frequency @ -6dB: 0.080 MHz
Bandwidth @ -6dB: 89.310 %

Documented by: 

Measurements per ASTM E-1065-99 with instruments traceable to NIST in accordance with MIL-STD-45662A.

QMIFN-1104 Transducer Characterization



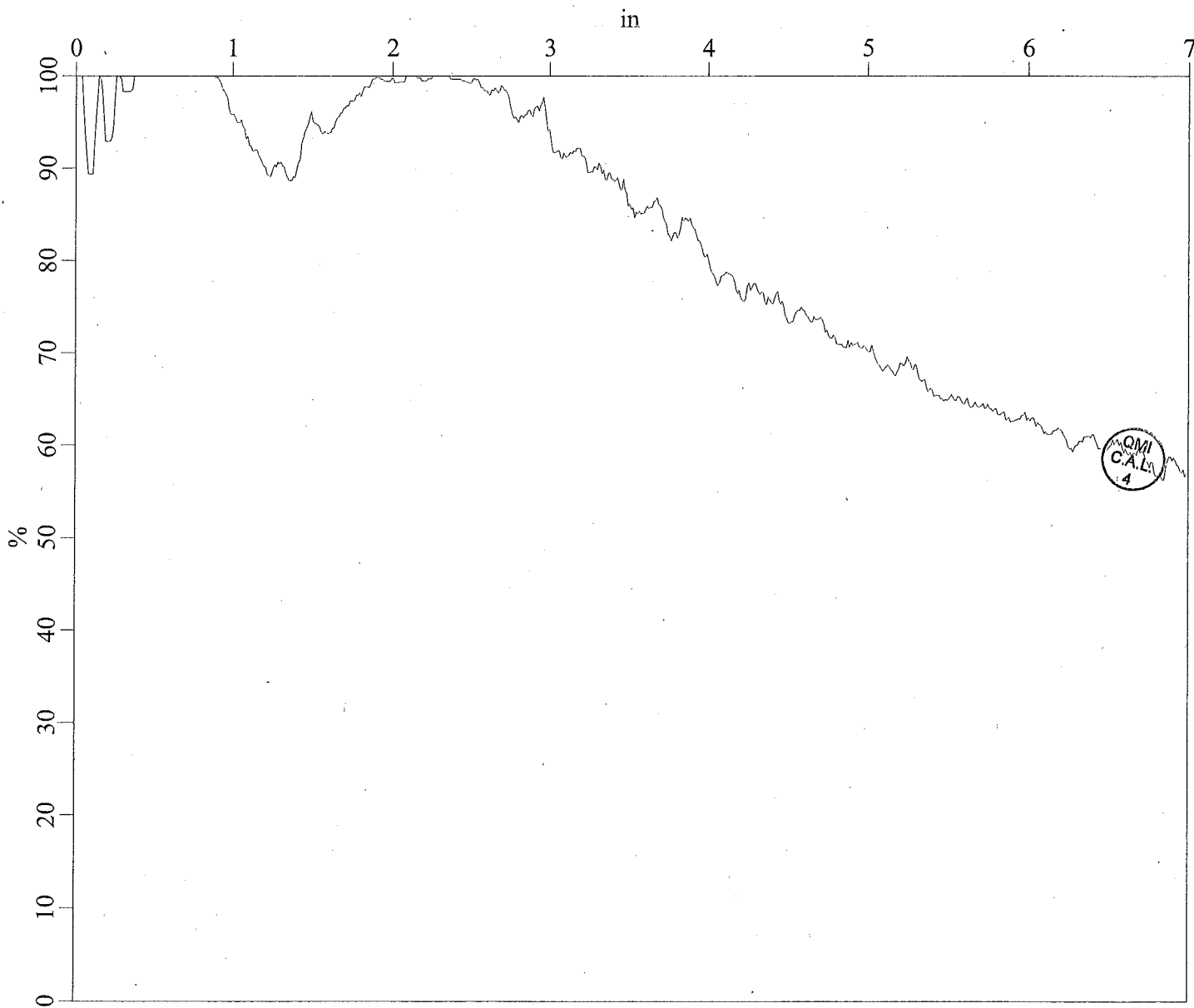
Filename: AR23 D-A (subset 1)
Date: 12/10/08 09:20:10

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 7.000
Resolution: 0.010 (700 points)

VERTICAL AXIS (%)

Start: 0.000
Length: 100.000
Resolution: 0.024 (4096 points)





QMIFN-1104 Transducer Characterization

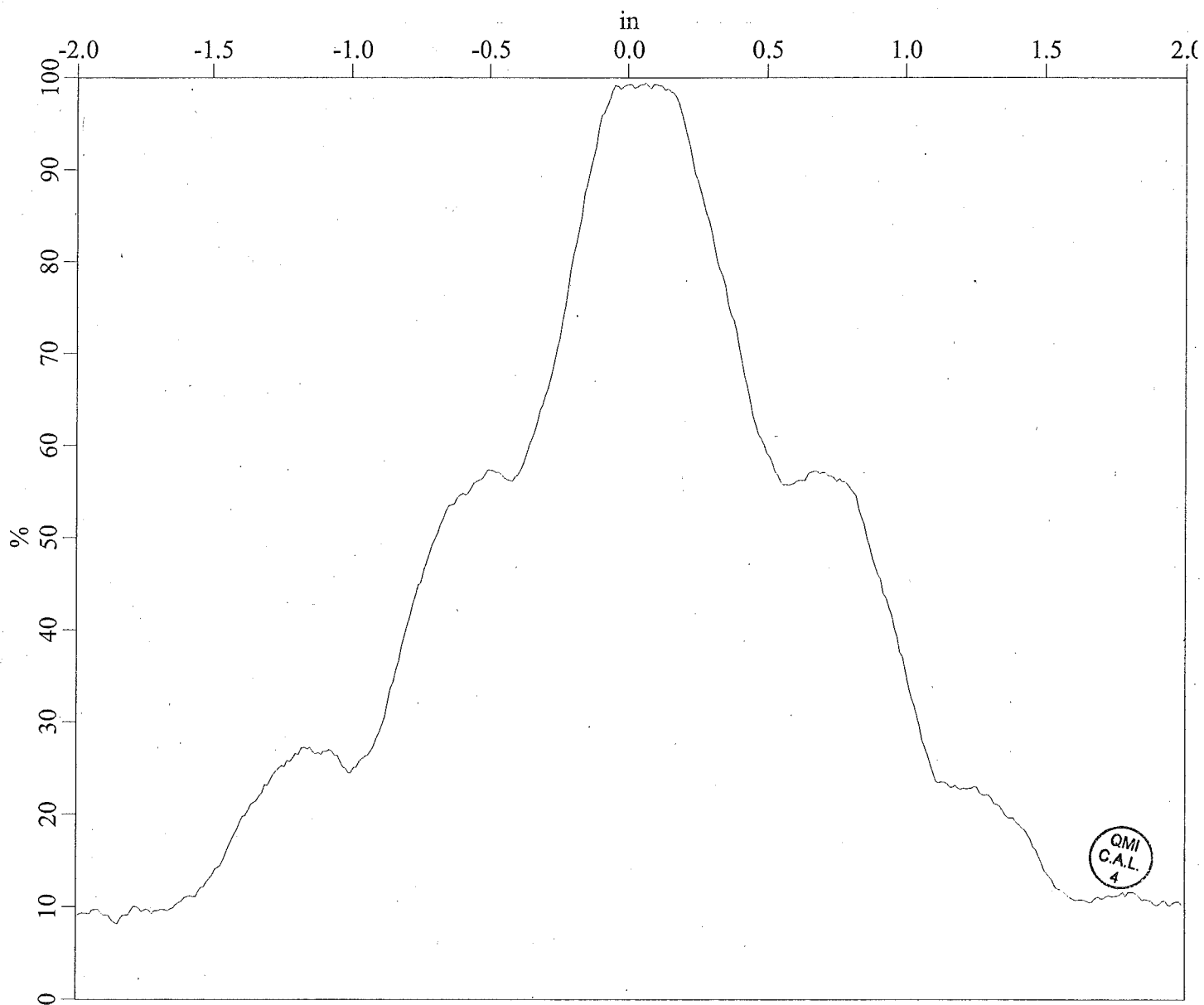
Filename: AR23 DIA (subset 1)
Date: 12/10/08 09:20:40

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -2.000
Length: 4.000
Resolution: 0.010 (400 points)

VERTICAL AXIS (%)

Start: 0.000
Length: 100.000
Resolution: 0.024 (4096 points)



Nondestructive Inspection Software



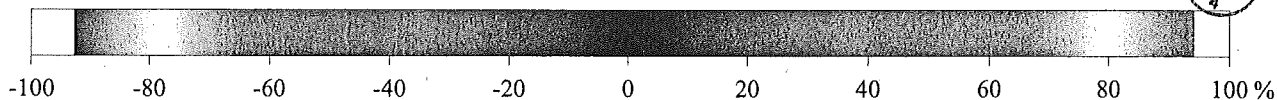
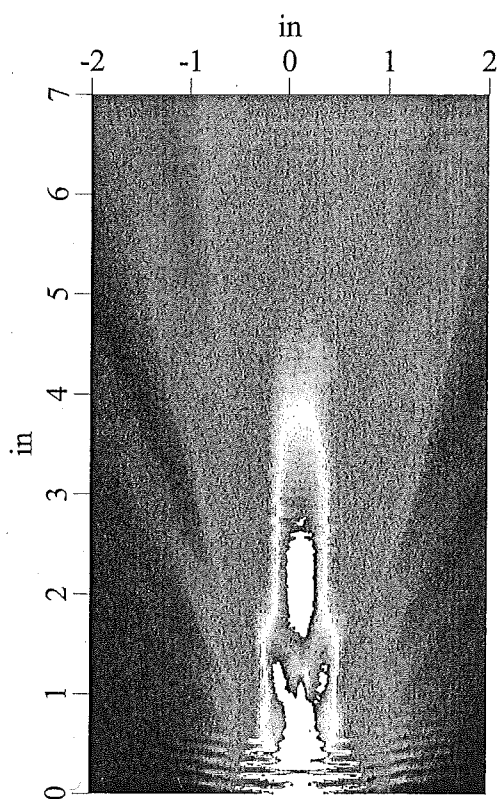
Filename: AR23 Transverse X Cscan (subset 1)
Date: 12/10/08 12:29:57

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -2.000
Length: 4.000
Resolution: 0.010 (400 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 7.000
Resolution: 0.010 (700 points)



QMI
C.A.L.
4



QMIFN-1104 Transducer Characterization

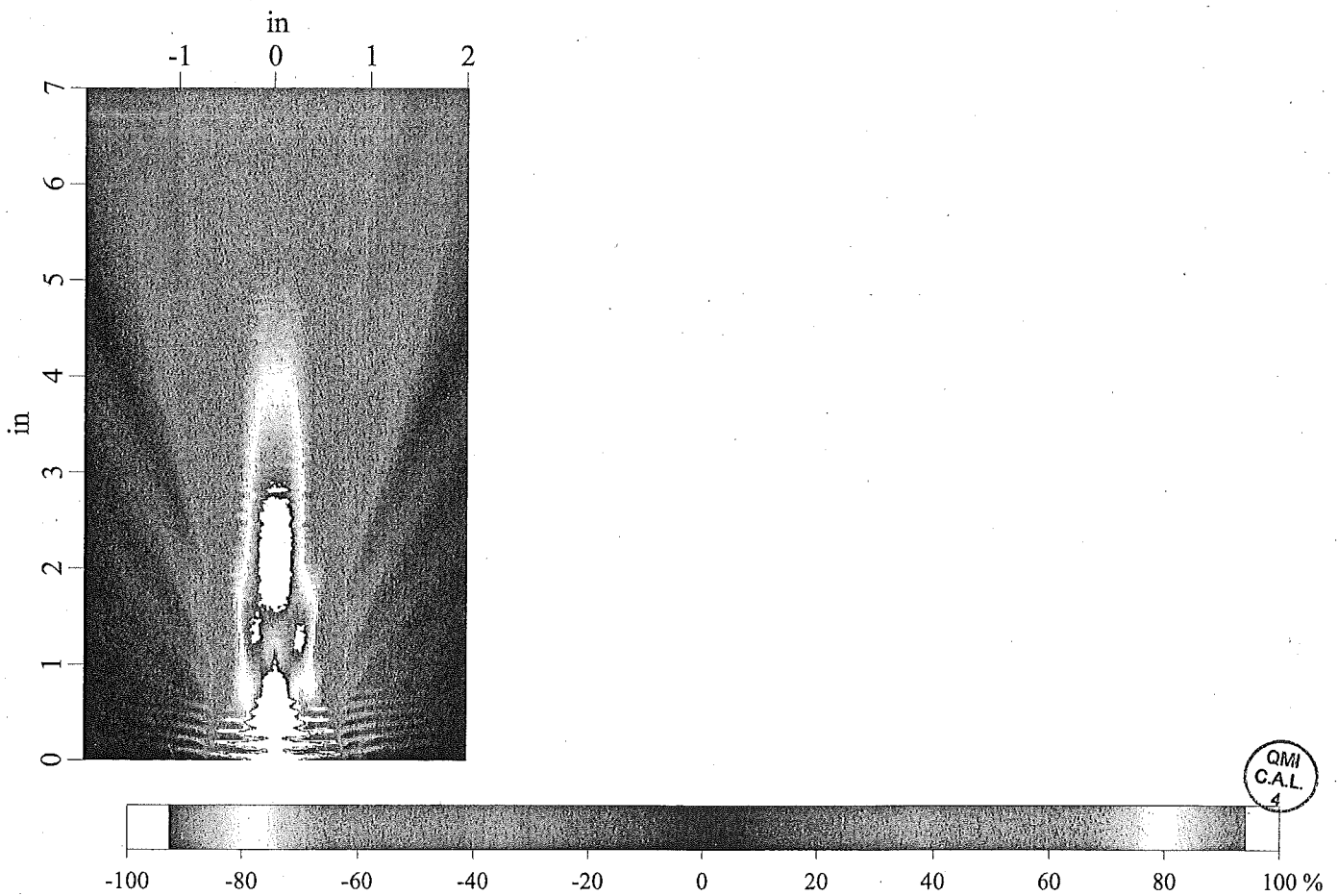
Filename: AR23 Transverse Y Cscan (subset 1)
Date: 12/10/08 13:36:18

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -1.999
Length: 4.000
Resolution: 0.010 (400 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: 0.000
Length: 7.000
Resolution: 0.010 (700 points)



QMIFN-1104 Transducer Characterization



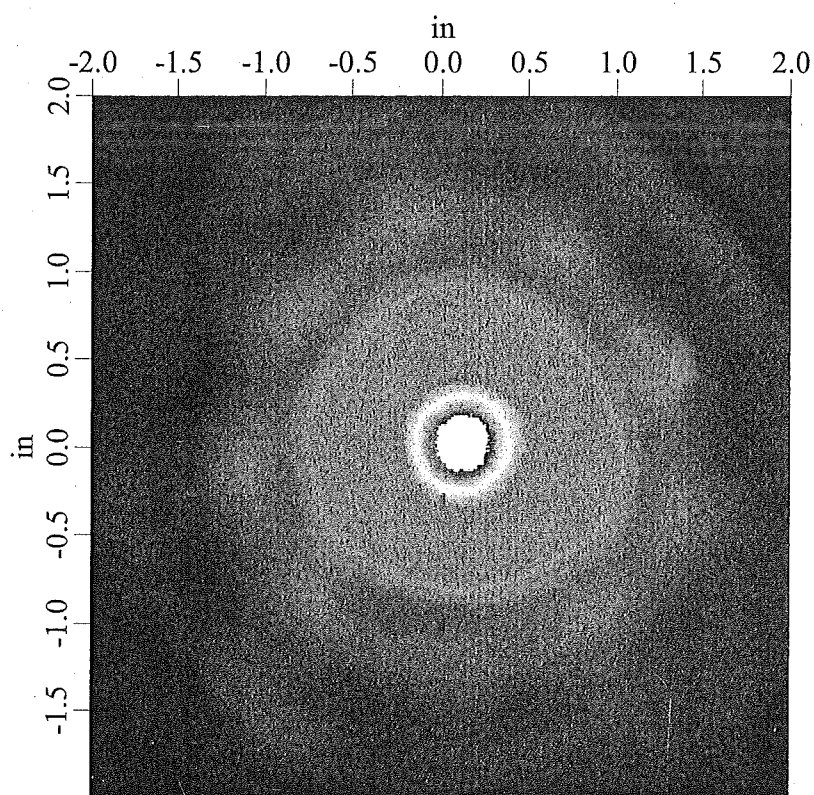
Filename: AR23 Beam Spot Cscan (subset 1)
Date: 12/10/08 14:16:50

HORIZONTAL AXIS (in)

Start: -2.000
Length: 4.000
Resolution: 0.010 (400 points)

VERTICAL AXIS (in)

Start: -1.999
Length: 4.000
Resolution: 0.010 (400 points)





QUALITY MATERIAL INSPECTION, INC.

QMIFN-1102: SONDA CALIBRATION CERTIFICATE

CUSTOMER Sonatest, PLC CERTIFICATION NO. 1615
ADDRESS Dickens Road, Old Wolverton PAGE 1 OF 3
CITY/STATE Milton Keynes, MK125QQ, England PO # PO06465
MODEL NO. SONDA 007CX SERIAL NO. 30284
CERTIFICATION DATE: 11/17/2008 TEMP: 73°
RECERTIFICATION DATE: 11/17/2009 HUMIDITY: 35%

QMI hereby certifies that the above instrument meets or exceeds the published specifications listed using the procedures contained within the specifications or as noted and has been checked using industry accepted standards whose accuracies are acceptable under the limitations of Airscan techniques. Our certification system is in compliance with MIL-STD-45662A.

CONDITION RECEIVED

☒ X NEW
☐ WITHIN TOLERANCE
☐ OUT OF TOLERANCE
☐ OPERATIONAL FAILURE

CONDITION RETURNED

☒ X WITHIN TOLERANCE
☐ OUT OF TOLERANCE
☐ LIMITED CERTIFICATION
(REFER TO THE REPORT)

Internal adjustments and measurements where applicable have been made with instruments which are traceable to the National Institute of Standards and Technologies under the following NIST report numbers:
NIST REPORT NUMBERS

AC/DC VOLTAGE: 60239-02, 60867-02 FREQUENCY: 60867-01, 60867-02

TEMPERATURE / HUMIDITY: 4184-1410146

TECHNICIAN

CERTIFIED BY:

QUALITY CONTROL MANAGER





QUALITY MATERIAL INSPECTION, INC.

MEASUREMENT & TEST EQUIPMENT

The equipment in the list below is maintained calibration traceable to NIST under the report numbers listed on the CERTIFICATE OF CALIBRATION sheet of this certification.

CERTIFICATION NO. 1615

This sheet is part of a multi-part report bearing the above certification number. The report may not be copied in part.

MFG.	FUNCTION	MODEL	SERIAL NUMBER	CALIBRATION DUE
Agilent Technologies	Function Generator	33220A	MY3000436	01/07/2009
Agilent Technologies	Frequency Counter, Voltage Measurements	53131A	MY40007730	01/07/2009
Tektronix	Oscilloscope, Voltage Measurements	2221	B020600	04/23/2008
VWRbrand	Thermo-Humidity Meter	61161-378	61846846	09/25/2008

ANCILLARY EQUIPMENT

MFG.	DESCRIPTION	MODEL	SERIAL NUMBER	APPLICATION
QMI	AIRSCAN TRANSDUCERS	AS400A	AF68 (T), AG26 (R)	BURN-IN
QMI	COAXIAL CABLES	BB-3-174	N/A	BURN-IN
FLUKE	DIGITAL MULTIMETER	12	54180122	TROUBLESHOOTING

TECHNICIAN

CERTIFIED BY:

QUALITY CONTROL MANAGER



QUALITY MATERIAL INSPECTION, INC.

PROCEDURE

The parameters listed below were measured using QMI Instrument Calibration Procedure QMITP-1102, which contains the specifications for this certification.

INSTRUMENT PERFORMANCE

CERTIFICATION NO. 1615

This sheet is part of a multi-part report bearing the above certification number. The report may not be copied in part.

PARAMETER	50 kHz	120 kHz	225 kHz	400 kHz	ACCEPT	REJECT
ANALOG OUT (VDC) 25%	1.22	1.22	1.22	1.22	X	
ANALOG OUT (VDC) 50%	2.51	2.51	2.51	2.51	X	
ANALOG OUT (VDC) 100%	5.00	5.00	5.00	5.00	X	
RF OUT (VAC P/P) 25%	0.26	0.26	0.26	0.26	X	
RF OUT (VAC P/P) 50%	0.50	0.50	0.50	0.50	X	
RF OUT (VAC P/P) 100%	1.00	1.00	1.00	1.00	X	
BASLINE AT 0%	OK	OK	OK	OK	X	
GAIN LINEARITY, 20 dB	OK	OK	OK	OK	X	
GAIN LINEARITY, 40 dB	OK	OK	OK	OK	X	
GAIN LINEARITY, 60 dB	OK	OK	OK	OK	X	
PRF, 150 Hz	152	152	152	152	X	
PRF, 200 Hz	200	200	200	200	X	
PRF, 300 Hz	N/A	N/A	300	300	X	
PRF, 500 Hz	N/A	N/A	500	500	X	
TONEBURST CYCLES, 15	15	15	15	15	X	
RECEIVER BANDWIDTH, kHz (-6dB)	44 - 58	109 - 132	212 - 247	388 - 411	X	
TRANSMITTER BANDWIDTH, kHz (MIN/MAX)	38 - 61	93 - 152	176 - 302	329 - 506	X	

NOTES:

TECHNICIAN

CERTIFIED BY:

QUALITY CONTROL MANAGER

